



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Olli Sund

Käyttöveden lämmitys aurinkosähköllä pääkaupunkiseudun omakotitaloissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

27.5.2020

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Olli Sund Käyttöveden lämmitys aurinkosähköllä pääkaupunkiseudun omakotitaloissa 46 sivua + 4 liitettä 27.5.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Lehtori Jukka Karppinen
<p>Insinööriyössä selvitettiin käyttöveden lämmityksen kannattavuutta aurinkosähköllä pääkaupunkiseudun omakotitaloissa. Erityisesti haluttiin selvittää, voidaanko aurinkosähköjärjestelmän takaisinmaksuaikaa parantaa mahdollisemman yksinkertaisella ja kevyellä ratkaisulla, johon ei kuulu invertteriä.</p> <p>Työn ensimmäinen vaihe suoritettiin tutustumalla alan kirjallisuuteen ja muihin tietolähteisiin. Tutkimusten pohjalta esiteltiin aurinkosähkön tuottopotentiaalia Suomessa sekä aurinkosähkövoimalan peruskomponentit. Työssä perehdyttiin myös kotitalouksien veden kulu- tukseen, veden lämmitykseen kuluvaan energiaan ja niihin vaikuttaviin tekijöihin. Työssä tutkittiin myös aurinkosähköjärjestelmiin liittyviä kannattavuustekijöitä.</p> <p>Työn toisessa vaiheessa tehtiin ylätasen määrittäminen kahdelle erityyppiselle aurinkosähköjärjestelmälle, joille suoritettiin kannattavuustarkastelut. Toisessa järjestelmässä oli mukana invertteri ja toisesta se jätettiin pois. Järjestelmille arvioitiin investointikustannukset verkosta löydettyjen jälleenmyyjien hinnastojen pohjalta. Asennuksista pyydettiin hinta-arvioita asennusliikkeiltä. Järjestelmille laadittiin arviot niiden tuottopotentiaalista Helsingin Kona- lassa sijaitsevalle esimerkkikohteelle. Lähtötietojen pohjalta järjestelmille tehtiin kannatta- vuuslaskelmat FinSolar-hankkeessa laaditulla riippumattamolla kannattavuuslaskurilla.</p> <p>Järjestelmälle, johon ei kuulunut invertteriä, saatiin takaisinmaksuajaksi 16–19 vuotta. Pa- neelit suoraan varaajan vastukseen kytkemällä kuitenkin menetetään suuri määrä tuote- tusta energiasta. Järjestelmälle, johon kuului invertteri, saatiin takaisinmaksuajaksi 15–18 vuotta.</p> <p>Aurinkosähköjärjestelmän kannattavuustarkastelu on tehtävä aina kohdekohtaisesti. Kan- nattavuuteen vaikuttavia seikkoja ovat muun muassa investoinnin hinta, huoltokulut, järjes- telmän vuosituotto, korvattavan energian ostohinta ja sen kehitys sekä oman käytön osuus tuotetusta energiasta.</p>	
Avainsanat	aurinkosähkö, vedenlämmitys, kannattavuuslaskenta

Author Title Number of Pages Date	Olli Sund Cost-effectiveness of domestic hot water heating using solar electricity in detached houses in Helsinki metropolitan area 46 pages + 4 appendices 27 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Professional Major	Electrical power engineering
Instructors	Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to investigate the cost-effectiveness of domestic hot water heating using solar electricity in detached houses in Helsinki metropolitan area. Special emphasis was placed on finding out if the payback period of photovoltaic systems could be shortened by a simple and light system design. Ideally that would mean no inverter was used in the system.</p> <p>In the first phase of the thesis a research into relevant literature and other information sources was carried out. Based on this research the production potential of solar power generation in Finland is presented. Also, the main components of solar power systems are covered. Research into domestic water consumption and the energy it requires was also carried out. Some factors that contribute to PV-system cost-effectiveness are also discussed.</p> <p>In the second phase of the thesis two solar power systems were defined on top-level. The cost-effectiveness of these two systems were then investigated. One of the systems included an inverter while the other didn't. The cost of investment was defined by price research in online shops. The price of installation was defined by asking an estimate from licensed electricians. The production potential for both systems were defined by choosing an example location in Konala, a part of town in Helsinki. With the initial information defined, a cost-effectiveness calculator designed for solar electricity systems was used to carry out the calculations.</p> <p>The payback period for the system that doesn't include an inverter was calculated as 16 to 19 years. Connecting the panels directly to the boiler's heating element will lead to a significant waste of energy. The payback period for the system with an inverter was calculated as 15 to 18 years.</p> <p>The cost-effectiveness analysis for solar power systems must be done on case-by-case basis. Factors that affect the systems cost-effectiveness include the cost of investment, cost of maintenance, produced energy, the price of electricity and its development and how much energy of the energy produced can be utilized.</p>	
Keywords	solar power, water heating, cost-effectiveness analysis

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aurinko-olosuhteet Suomessa	2
2.1	Auringon säteilyenergia	2
2.2	Auringon säteilyn määrä Suomessa	2
2.3	PVGIS	3
3	Aurinkopaneelit	5
3.1	Aurinkopaneelityypit	5
3.2	Aurinkopaneelien ominaisuudet	7
4	Aurinkosähköjärjestelmän osat	11
4.1	PWM-säädin	11
4.2	MPPT-säädin	11
4.3	Invertteri	14
4.4	Kaapelit	16
4.5	Varaaja ja varaajan vastus	20
5	Lämpimän käyttöveden tuottaminen ja kulutus	23
6	Käyttöveden lämmityksen kannattavuus aurinkosähköllä	25
6.1	Kannattavuustekijät	25
6.2	Esimerkkikohde ja lähtöoletukset	27
6.3	Laskuri ja kannattavuuslaskennat	34
7	Luvat ja sopimukset	38
7.1	Toimenpidelupa ja rakennuslupa	38
7.2	Verkkoon liittyminen	38
7.3	Sopimustyytit verkkoon liitetulle aurinkovoimatuotannolle	39
8	Yhteenveto	41

Liitteet

Liite 1. Amerisolar AS-6M30-HC-paneelin sähköiset ominaisuudet

Liite 2. JA Solar JAM60S01 290-310/PR-paneelin sähköiset ominaisuudet

Liite 3. Yhteenveto investoinnin tuotto- ja kannattavuuslaskelmat järjestelmälle yksi 10 prosentin hyötysuhteella

Liite 4. Yhteenveto investoinnin tuotto- ja kannattavuuslaskelmat järjestelmälle kaksi 10 prosentin hyötysuhteella

Lyhenteet

MPP	Maximum Power Point. Maksimitehopiste on se kohta aurinkopaneelin ominaiskäyrällä, missä paneelin antama teho on suurimmillaan.
MPPT	Maximum Power Point Tracking. Maksimitehopisteen seuranta on lataussäätimien käyttämä tekniikka, jossa säädin etsii paneelien hetkellisen MPP-pisteen aurinko-olosuhteiden muuttuessa.
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System. Paikkatietoon ja säädataan perustava laskuri, jolla voidaan arvioida aurinkosähkövoimalan tuotantopotentiaalia paikallisesti.
PWM	Pulse-width modulation. Pulssinleveysmodulaatio on modulointitapa, jossa kuormaan menevää jännitettä säädetään sitä tiheästi katkomalla. Kyt-kentä- ja katkaisuaikojen suhdetta säätämällä saavutetaan käyttötarkoitukseen sopiva jännitetaso.
Wp	Piikkiwatti tarkoittaa aurinkopaneelin enimmillään tuottamaa tehoa standardiolosuhteissa.

1 Johdanto

Tämä työ on tehty Metropolia Ammattikorkeakoulun toimeksiantona. Työssä tutkitaan käyttöveden lämmityksen kannattavuutta aurinkosähköä hyväksikäyttäen pääkaupunkiseudun omakotitaloissa.

Aurinkosähkötuotantokanta on ollut kasvussa Suomessa. Samalla paneelien hintakehitys on ollut laskeva jo vuosia. Paneelitekniikan nopean kehittymisen ja halpenevan hinnan vuoksi erilaiset kannattavuustarkastelut ovat ajankohtaisia.

Aurinkoenergian hyödyntämisen kohteeksi valittiin omakotitaloasujan käyttöveden lämmitys. Käyttöveden lämmitykseen kuluva energia voi olla jopa viidennes koko kotitalouden energiankulutuksesta. Suomi on aurinko-oloiltaan hyvin vaihtelevaa aluetta, joten tarkastelu rajattiin Etelä-Suomen pääkaupunkiseudulle. Tarkastelu rajattiin myös sähkölämmitteiseen omakotitaloasumiseen, eli muut asumis- ja lämmitysmuodot on rajattu työn ulkopuolella.

Työssä käydään läpi, mistä komponenteista aurinkosähköjärjestelmä koostuu. Työssä käydään myös läpi kotitalouksien veden- ja energiankulutusta. Lopuksi suoritetaan kannattavuustarkastelut kahdelle eri järjestelmälle.

2 Aurinko-olosuhteet Suomessa

2.1 Auringon säteilyenergia

Lämpödynreaktion vuoksi auringosta vapautuu energiaa kokonaisteholla $3,8 \cdot 10^{23}$ kW. Tästä tehosta $1,7 \cdot 10^{14}$ kW:n osuus tulee maapallolle. Maanpinnalle asti tulevan säteilyn määrä on noin $0,8 - 1,0$ kW/m² kirkkaana päivänä. Maapallon ilmakehä heikentää maanpinnalle saapuvaa säteilyn määrää. Auringonsäteily voidaan jaotella kolmeen eri tyyppiin ilmakehän vaikutuksen mukaan. Suoralla auringonsäteilyllä tarkoitetaan nimensä mukaisesti suoraan ilmakehän läpi saapuvaa säteilyä. Ilmakehän molekyylien, pilvien ja maan kautta heijastuvaa säteilyä kutsutaan hajasäteilyksi. Vastasäteilyllä, eli ns. kasvihuonevaikutuksesta johtuvalla säteilyllä, tarkoitetaan ilmakehän vesihöyrystä, hiilidioksidista ja otsonista maan pinnalle takaisin heijastuvaa lämpöä. Maanpinnalle saapuva Auringon kokonaissäteily on edellä mainittujen säteilytyyppien summa. [2, s. 10–12.]

2.2 Auringon säteilyn määrä Suomessa

Suomen pohjoisen sijainnin vuoksi auringon säteilyn määrä jakautuu vuodelle epätasaisesti. Suomessa vuosittainen auringon säteilyenergian määrä optimiasennossa oleville aurinkopaneeleille on etelässä noin 1100 ja Keski-Suomessa noin 1000 kWh paneelineliometriä kohden. Vuodenajalla ja hetkittäisellä säätilalla on voimakas vaikutus auringosta maanpinnalle päätyvän säteilyn määrään. Aurinkoenergian kannalta haasteena Suomessa on talven vuorokausien lyhyt valoisa aika. Joulukuussa talvipäivän seisauksen aikaan päivän pituus Helsingissä on vain noin 6 tuntia. Samaan aikaan napapiirillä on kaamos eikä aurinko nouse horisontin yläpuolelle lainkaan. Vuoden pimeimpänä aikana, marraskuusta tammikuuhun, aurinko on näkyvissä Helsingissä keskimäärin vain tunnin vuorokaudessa. [1, s. 14–17; 2, s. 24.]

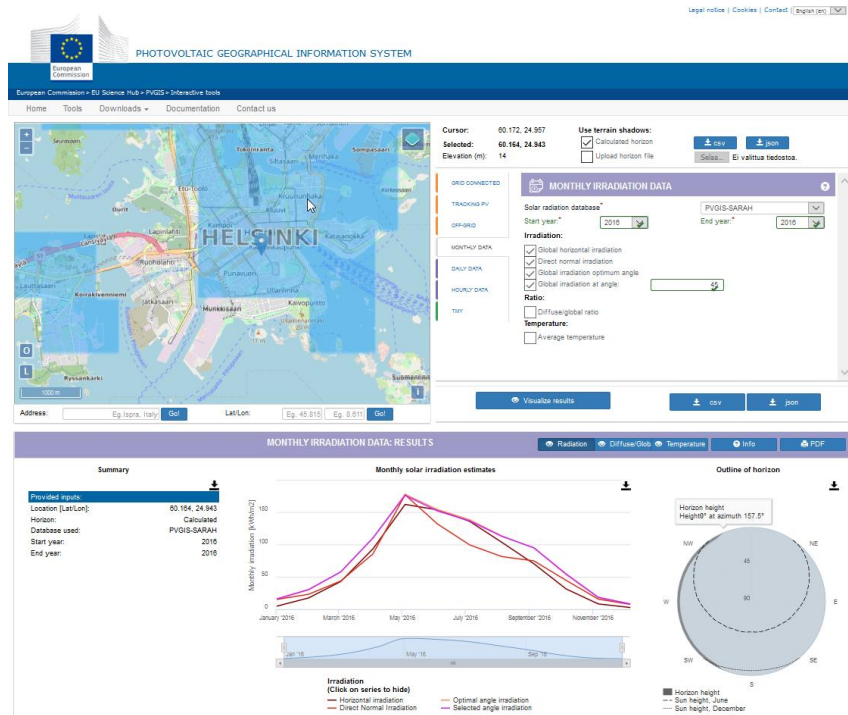
Talven pitkistä pimeästä jaksosta huolimatta Suomessa on hyvä potentiaali energian tuottamisella aurinkosähköllä vuositasolla. Kevään ja alkusyksyn kylmät mutta aurinkoiset päivät sekä pitkät kesäpäivät lisäävät tuotantoa. Parhaat olot aurinkosähkön kannalta ovat etelä- ja länsirannikolla sekä lounaissaaristossa ja Ahvenanmaalla. Edellä maini-

tuilla alueilla vuodessa kertyy keskimäärin 1800 – 2000 aurinkotuntia [9]. Ilmatieteen laitoksen mukaan laskettua paisteaikaa kertyy, mikäli suoran säteilyn intensiteetti on suurempi kuin 120 W/m^2 [10].

Paras tuotto Suomessa saadaan, kun paneelit suunnataan kohti etelää ja sijainnista riippuen 40–50 asteen kallistuskulmaan [3, s. 120]. Helsingissä optimikulma on noin 40 astetta [6, s.27]. On tavallista, että kiinteistöasennuksissa päädytään katon myötäiseen asennukseen tavan siisteyden ja helppouden vuoksi, vaikka katon kulma poikkeaisi optimaalisesta. Tällöin on pohdittava, kannattaako kulman muutoksen vaatima lisäinvestointi. Kulman muutoksen vaatimaa lisäinvestointia on verrattava voimalan käyttöiän aikana saavutettavaan lisätuotantoarvioon. Aurinkosähköjärjestelmän tuottoa voidaan parantaa seurantajärjestelmällä. Tällöin paneelit seuraavat aurinkoa pysty- ja vaakasuunnassa. Seurantajärjestelmät ovat kuitenkin melko harvinaisia. Paneelien asennustavalla on myös vaikutusta paneeliston lämpenemiseen ja täten myös odotettuun tuottoon. Maahan asennetuissa paneelistoissa ilma pääsee kiertämään vapaammin, mikä edesauttaa paneelien jäähtymistä. Kattoon kiinni asennetuissa paneeleissa ilman kierto voi olla rajallisempaa, ja tuotanto voi pudota noin 4,5 %. [3, s. 123.]

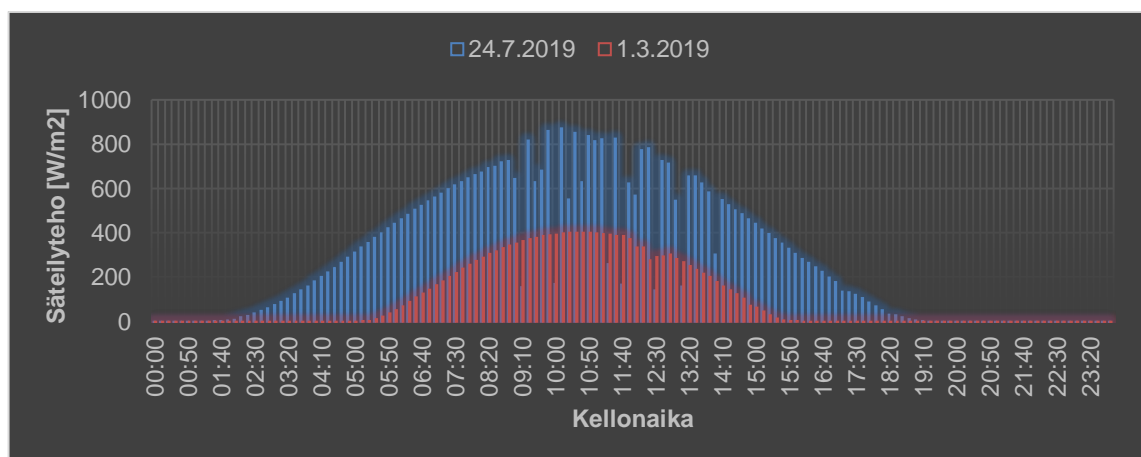
2.3 PVGIS

Aurinkosähköjärjestelmien tuottoa voidaan arvioida erilaisilla työkaluilla, kuten Euroopan komission PVGIS-työkalulla. Työkaluilla voidaan tehdä laskelmia muun muassa kohdekohtaisesta auringon säteilyenergian määrästä ja erilaisten aurinkosähköjärjestelmien tuotto-odotuksista tietokantoihin kerätyn paikkatiedon pohjalta. Kuvassa 1 on esitetty PVGIS-työkalun avulla tehdyt laskelmat vuoden 2016 kuukausittaisesta auringonsäteilymäärästä Helsingissä sijaitsevalle kohteelle. Tässä työssä kyseistä työkalua on käytetty arvioimaan esimerkkeinä käytettyjen aurinkosähköjärjestelmien tuottopotentiaalia. [11.]



Kuva 1. Euroopan komission ylläpitämän PVGIS-työkalun käyttöliittymä [11].

Aurinko- ja säädataa löytyy myös useista muistakin lähteistä. Esimerkiksi ilmatieteenlaitos tarjoaa sää- ja säteilyhavaintoja ladattavassa muodossa ilmaiseksi. Kuvassa 2 on esitetty Ilmatieteenlaitoksen Kumpulan sääaseman havaintoaineiston pohjalta auringon kokonaissäteilyteho kahden vuorokauden osalta vuonna 2019.



Kuva 2. Ilmatieteenlaitoksen Kumpulan sääaseman havaintodata auringon säteilyintensiteetin jakautumisesta kahden vuorokauden osalta vuonna 2019.

Kuvaajasta nähdään, että heinäkuun 24. päivänä maanpinnalle asti tulevan säteilyn määrä on parhaimmillaan edellä mainitun $0,8 - 1,0 \text{ kW/m}^2$ välillä. Kuvaajasta nähdään myös säteilyn intensiteetin jakautuminen päivän aikana. Huhtikuussa säteilyn intensiteetti on odotetusti huomattavasti pienempi.

3 Aurinkopaneelit

3.1 Aurinkopaneelityypit

Aurinkopaneelityypit voidaan luokitella kolmeen eri sukupolveen. Ensimmäiseen sukupolveen kuuluvat perinteiset piistä valmistetut yksi- ja monikidepaneelit. Tämän sukupolven paneelit ovat hyötysuhteeltaan yhä tehokkaampia uudempiin sukupolviin verrattuna ja ne muodostavat valtaosan kaupallisesti myydyistä paneeleista tänäkin päivänä [5].

Yksikidepiikennot

Yksikidepiikennoista valmistetut paneelit ovat vanhin, mutta vielä yksi käytetyimmistä paneeliteknologioista. Yksikidekennojen hyötysuhde on paneelityypeistä paras sen ollessa 16-25 % [3, s. 58]. Tämä tarkoittaa, että yksikidepaneeli tuottaa enemmän sähköä pinta-alayksikköä kohden kuin muut paneelityypit. Yksikidepaneelien tuotantoteho kuitenkin kärsii herkemmin esimerkiksi puiden aiheuttamasta varjostuksesta kuin monikidepaneelin. Korkeiden tuotantokustannusten vuoksi yksikidepaneelit ovat kalliimpia muihin tyyppeihin verrattuna. [4, s. 12–13.]

Monikidepiikennot

Monikidepaneeleita voidaan valmistaa yksikiteisen piin valmistuksessa syntyvästä leikkuujätteestä. Jäte sulatetaan ja voidaan kiteyttää haluttuun muotoon. Sulatus ja kiteytys aiheuttavat kiteisiin virheitä, jonka vuoksi niitä kutsutaan monikiteisiksi. Kidevirheiden vuoksi paneelin hyötysuhde kärsii. Monikidepaneelin hyötysuhde onkin yleensä alle 20 % [3, s. 58]. Monikidepii ei kuitenkaan ole yhtä herkkä varjostukselle rakenteensa vuoksi. Kuvassa 3 nähdään yksi- ja monikidepaneelien kattoasennuksia.



Kuva 3. Vasemmalla monikide- ja oikealla yksikidepiikkeennoista koostuvat katolle asennetut aurinkopaneelit [12].

Monikidepiin tehokkuus laskee herkemmin korkeissa lämpötiloissa. Kennojen valmistaminen on kuitenkin halvempaa, joten monikidepaneelin hinta on yksikidepaneelia halvempi. Monikidepaneelit ovat kiinteistökäytössä yleisin paneelityyppi. [4, s. 12–13; 5.]

Ohutkalvopaneelit

Toisen sukupolven aurinkopaneeleita kutsutaan ohutkalvopaneeleiksi ja ne valmistetaan amorfisesta tai mikrokiteisestä piistä, CIGS-yhdisteistä tai CdTe-yhdisteistä. Nimensä mukaisesti ne ovat rakenteeltaan hyvin ohuita, kevyitä ja joustavia perinteisiin yksi- ja monikidepaneeleihin verrattuna. Käytetyn materiaalin vähäisyyden ja valmistustekniikoiden edullisuuden vuoksi ne ovatkin hinnaltaan tyypillisesti ensimmäistä sukupolvea halvempia. Amorfisesta piistä valmistettujen paneelien hyötysuhde on noin 5-10 %. CIGS (Copper-Indium-Gallium-Selenide) -paneelien hyötysuhde on noin 7-16 %. CIGS-paneelien kerrokset voidaan tehdä niin ohuiksi, että paneeleita voi käyttää taivutettavissa paneelisovelluksissa. Muun muassa heikomman hyötysuhteensa vuoksi ohutkalvopaneeleita on aikaisemmin käytetty tavallisimmin pienemmissä kohteissa, kuten veneissä ja asuntoautoissa. Kuvassa 4 nähdään, kuinka joustavia paneeleita voidaan käsitellä. Nykyään kuitenkin markkinoilta löytyy vaihtoehtoja myös suuremman kokoluokan kohteisiin. Esimerkiksi kotimainen Virve Solar tarjoaa aurinkosähköjärjestelmiä, joissa CIGS -tyypin ohutkalvopaneelit liimataan suoraan kattopeltiin. CdTe (Cadmium-Telluride) paneelien hyötysuhde on myös noin 7-16 %.



Kuva 4. Ohutkalvotekniikalla toteutettujen joustavien aurinkopaneelien asennus [13].

CdTe-kennot ovat perinteisiä piikkenoja halvempia, mutta niiden sisältämä myrkyllinen kadmium vaikeuttaa käytettyjen paneelien kierrätystä ja loppusijoitusta. [4, s. 12–13; 5.]

Kolmannen sukupolven paneelit

Kolmannen sukupolven paneeleilla tarkoitetaan yleisesti vielä kehitysasteella olevia erilaisia paneelityyppejä. Kehitteillä olevia kennotyyppejä ovat mm. väriaineherkistetyt (DSSC), orgaanisen aurinkosähkön (OPV) ja kvanttipistekennojen lisäksi erityisesti Suomessaakin tutkittavat perovskiittiset aurinkokennot. [8.]

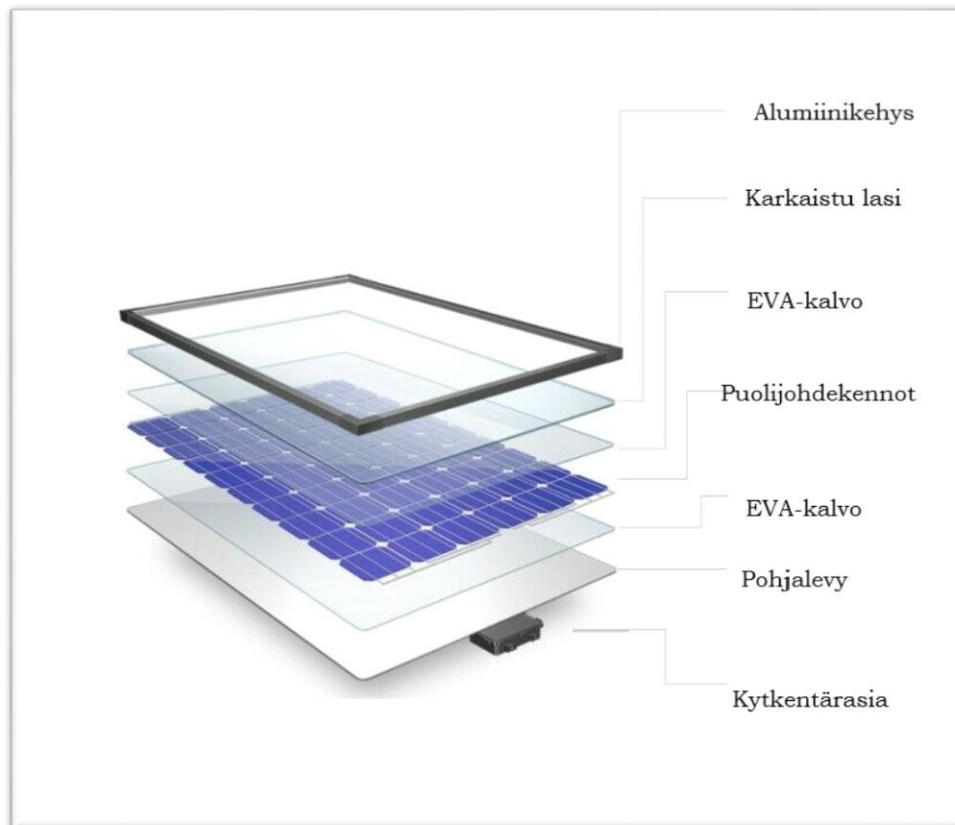
3.2 Aurinkopaneelien ominaisuudet

Paneelien kokoonpano

Aurinkopaneelit koostuvat sarjaan kytketyistä, kooltaan noin 156 mm x 156 mm puolijohdekennoista. Yhden kennon jännite on noin 0,6 V. Kytkemällä kennoja sarjaan saadaan niiden jännite kertautumaan virran pysyessä vakiona, jolloin saavutetaan riittävän korkea käyttöjännite. Tavallinen kennojen määrä paneelissa on 36, jolloin paneelin antama jännite on noin 20 V. Edellä mainitun paneelin mitoiksi tulee noin 670 mm x 1480 mm ja

tehon huippuarvoksi noin 150 Wp. Kennojen määrän ollessa 60 paneelin jännite nousee noin 35:een ja huipputeho on noin 250 Wp.

Aurinkopaneelin rakennetta on havainnollistettu kuvassa 5. Sarjaan kytketyt kennot asennetaan komposiittimuovista valmistetulle pohjalevyille. Kennot pakataan etyyli-viinyli-asetaattikalvon eli eva-kalvon sisään, joka suojaa kennoja UV-säteilyltä. Paneelin yläpinnalle tulee noin kolmesta kuuteen millimetriä paksu, kestävä karkaistu lasilevy. Paneelin reunoille laitetaan suojaavat, esimerkiksi alumiinista valmistetut, listat. Paneelien rakenne suojaa kennoja ilmalta ja kosteudelta. Suojalasi on myös sään kestävä. Puoli-johdekennot itsessään ovat varsin kevyitä, mutta muut rakenteet nostavat paneelin painon esimerkiksi 250 watin paneelilla noin 20 kiloon. [3, s. 64–68; 6, s. 44–46.]






Kuva 5. Aurinkopaneelin rakenne [14].

Tyypikilpi ja tärkeimmät sähköiset ominaisuudet

Aurinkopaneelien tärkeimmät sähköiset ominaisuudet on listattu tavallisesti paneelin taakse kiinnitettyssä tyypikilvessä. Tärkeimpiä arvoja ovat:

- Power (max) tai P_{max} on aurinkopaneelin suurin nimellinen tuotantoteho, joka kertoo kuinka suuren tehon paneeli tuottaa, kun siihen kohdistuu 1000 watin säteilyteho neliömetriä kohti.
- Toleranssi kertoo tehon mahdollisen vaihtelun suuruuden maksimista.
- I_{mp} on paneelin nimellisvirta maksimiteholla.
- V_{mp} on paneelin maksimitehon nimellisjännite.
- I_{sc} on paneelin oikosulkuvirta eli oikosuljetun paneelin virta.
- V_{oc} on avoimen piirin jännite eli kuormittamattoman paneelin jännite.
- System voltage (max) kertoo sarjaan kytkettyjen paneelien sallitun maksimijännitteen.

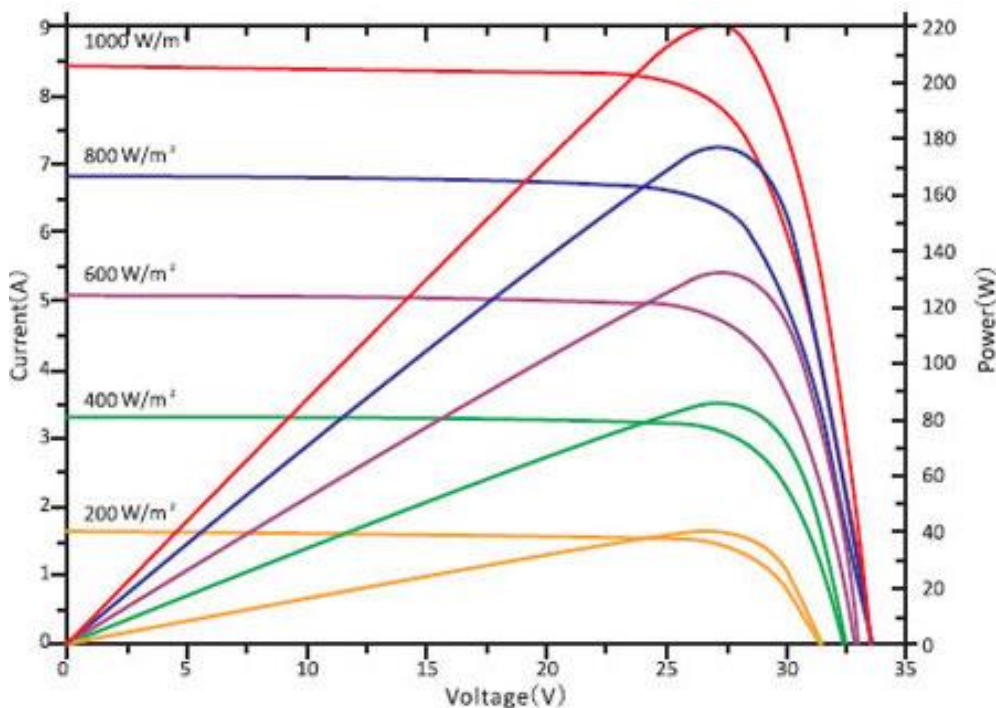
Kuvassa 6 on esitetty paneelin tyypikilpi, josta olennaiset sähköiset arvot ovat luetta-
vissa.

		
Technical Data		
MODULE TYPE:	MWG-10	
Peak Power (Pmax)	(W):	10
Production Tolerance	(%):	± 3
Maximum Power Current (Imp)	(A):	0.572
Maximum Power Voltage (Vmp)	(V):	17.49
Short Circuit Current (Isc)	(A):	0.61
Open Circuit Voltage (Voc)	(V):	21.67
Weight	(Kg):	1.1
Dimensions	(mm):	330*290*25
Maximum System Voltage	(VDC):	1000
Wind Resistance	(Pa):	2400
All technical data at standard test condition		
AM=1.5 E=1000W/M ² Tc=25°C		
		
25 Years Limited Output Guarantee		
		
www.mplenergy.pl		www.mwpower.pl

Kuva 6. Aurinkopaneelin tyypikilpi, josta voidaan lukea paneelin tärkeimmät sähköiset ominaisuudet [15].

On myös hyvä kiinnittää huomiota siihen, missä oloissa kyseiset arvot on määritetty. Standarditestissä käytetään 1000 W/m^2 säteilyarvoa ja 25 celsiusasteen ilman lämpötilaa. Tähän arvoon päästään Suomen oloissa kuitenkin harvoin. Suomen oloja vastaavat paremmin ns. normaalikäyttötestin olosuhteet. Normaalikäyttötestissä säteilyn voimakkuus on 800 W/m^2 , ilman lämpötila $+20$ celsiusastetta ja tuulen nopeus 1 m/s . Testiolosuhteet on yleensä mainittu tyyppikilvessä. [3, s.66–68; 6, s. 47–48.]

Valmistajat määrittävät paneeleille myös ominaiskäyrät standardiolosuhteissa. Ominaiskäyrä, eli ns. UI-käyrä, esittää paneelin virran ja jännitteen välisen riippuvuuden. Usein käyrät ilmoitetaan myös usealla eri auringon säteilyn voimakkuudella mitattuna. Kuvassa 7 on esitetty paneelin ominaiskäyrät usealle säteilyn intensiteetille.



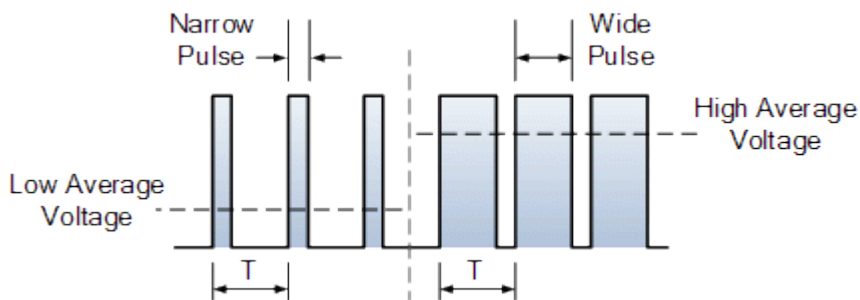
Kuva 7. Aurinkopaneelien ominaiskäyrät eri auringonsäteilyn voimakkuuksilla [16].

Kuvassa 7 on myös esitetty tehon ja jännitteen suhde omilla kuvaajilla. Näin kuvaajista nähdään selkeästi myöhemmin esiteltävä paneelien maksimitehospiste, joka sijaitsee UI-käyrän taitekohdassa.

4 Aurinkosähköjärjestelmän osat

4.1 PWM-säädin

PWM-säädin toimii pulssinleveysmodulaatioon perustuen. Säädin katkoo tiheään paneelin virtaa ja muuttaa kytkentätiheyttä siten, että paneelin jännite putoaa kuormalle sopivaksi. Säätimestä kuormalle menevä jännite siis riippuu säätimen virtapulssien pituudesta. Kuvassa 8 nähdään, kuinka säätimen kytkemistiheys vaikuttaa sen keskimääräiseen ulostulojännitteeseen. Akkuja ladataessa säätimet seuraavat akun varaustasoa ja säättävät latauspulsseja akun tilan perusteella. Säädin estää myös akun varauksen purkautumisen takaisin aurinkopaneeleihin silloin, kun auringonvaloa ei ole saatavilla. Paneelien jännite on usein hieman korkeampi kuin akkujen latausjännite, jonka vuoksi paneelien kytkeminen suoraan akkuun voi olla sille vahingollista. Säädin pudottaa paneelien jännitteen lataukseen sopivaksi.



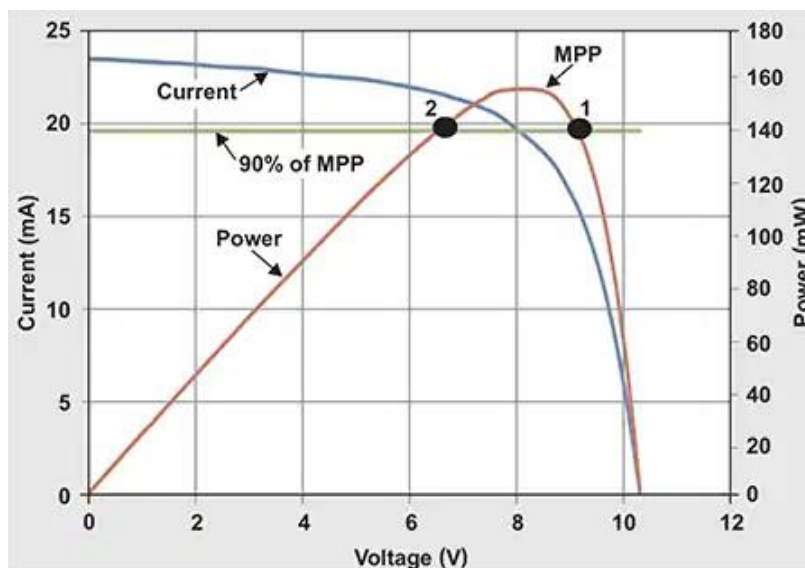
Kuva 8. PWM-säätimen pulssin leveyden vaikutus keskimääräiseen ulostulojännitteeseen.

Käytettäessä PWM-säädintä on aurinkopaneelien ja kuorman jännite on pyrittävä sovitamaan saman suuruiseksi. [6, s. 70; 17.]

4.2 MPPT-säädin

Aurinkopaneelista saatavaa energian määrää rajoittavat paneelin jännite ja virta. Auringon säteilyenergian sekä lämpötilan ollessa vakioita löytyy aurinkopaneeleille näille olosuhteille ominainen optimaalinen toimintapiste, eli ns. maksimitehon piste (Maximum Power Point). Toisin sanoen maksimitehon pisteessä paneelin virran ja jännitteen arvot ovat

sellaiset, että ne tuottavat paneelista suurimman mahdollisen tehon. Paneelista saatava teho P on jännitteen U ja virran I tulo, eli teho $P = UI$. MPPT-säätimen tarkoituksena on etsiä tehon maksimipiste säätämällä paneelien toimintajännitettä. Säädin pyrkii aina löytämään maksimitehon pisteen olosuhteiden, kuten sään muuttuessa. Auringonsäteilyn lisääntyessä luonnollisesti paneelista saadaan irti suurempi teho. On kuitenkin hyvä huomioida, että paneelin lämpeneminen aiheuttaa jännitteen alenemisen, ja siten myös paneelista saatava teho laskee. Käytännössä MPPT-säädin pyrkii täsmäämään aurinkopaneeliin liitetyn kuorman resistanssin aurinkopaneelin sisäisen resistanssin kanssa. Monesti aurinkopaneeliin kytkettävä kuorma vaatii joko vakiovirran tai vakiojännitteen. Ilman paneelien ja kuorman välissä olevaa säädintä kuorman ja paneelien sisäisen jännitteen yhteensovittaminen voi olla haasteellista ja paneeleista ei saada irti maksimaalista hyötyä. Kuvassa 9 on esitetty paneelin ominaiskäyrä ja MPP-piste. [18, s. 249–252.]



Kuva 9. Aurinkopaneelin ominaiskäyrä, johon on merkattu maksimitehon piste. Maksimitehopiste löytyy IV-käyrän "polvesta" [19].

Aurinkopaneelin oikosulkuvirta I_{SC} voi olla esimerkiksi 6,3 A ja tyhjäkäyntijännite U_{OC} 42,3 V, ja maksimiteho P_{MAX} 200 W. Tällöin maksimiteho saavutetaan virran ja jännitteen arvoilla 5,8 A ja 34,5 V. Jos esimerkiksi em. aurinkopaneelilla ladattaisiin akkua kytkemällä paneeli suoraan akun napoihin, jäisi paneelin jännite akun latausjännitteen suuruiseksi eli noin 12 V. Tällöin paneelin tehoksi jäisi noin 76 W, joka on huomattavasti vähemmän

kuin sen maksimiteho 200 W. Jos paneelit kytketään akkuun MPPT-säätimen kautta, nostaa säädin paneelien jännitteen maksimitehon pisteen arvon mukaiseksi. Säätimen hakkuriipiiri alentaa jännitteen akun lataukseen sopivaksi samalla kasvattaen latausvirran maksimitehon pistettä vastaavaan arvoon. Säädin käyttää pienen osan tehosta omaan toimintaansa, mutta MPPT-säätimien hyötysuhteet ovat todella hyvät, tyypillisesti 95–97 %. [6, s. 70–72.]

Tapoja, joilla MPPT-säätimet etsivät maksimitehon pisteen, on useita. Yksi tavoista on ns. ”Kokeile ja vertaa” -algoritmi. Säädin joko pudottaa tai kasvattaa paneelin jännitettä pienen askeleen verran, jonka jälkeen säädin laskee, kasvoiko vai putosiko paneeleista saatava teho. Jos teho kasvoi, säädin ottaa uuden askeleen tehoa kasvattaneeseen suuntaan ja toistaa laskennan. Jos teho laskee, säädin vaihtaa seuraavan askeleen vastakkaiseen suuntaan. Menetelmän kääntöpuolena voivat olla säätimen ottamat turhat edestakaiset askeleet, ja tämä voi näkyä toiminnan värähtelynä. [6, s. 72–73.]

Maksimitehon pisteen etsintä voi myös perustua aurinkopaneelin sisäisen differentiaali-sen resistanssin määrittämiseen. Tämä tapa on kokeile ja vertaa tyyppistä säädintä nopeampi, mutta vaatii myös enemmän laskentatehoa. Säädin tutkii, kuinka suuri on paneelin jännitteen muutos ΔU säätimen muuttaessa paneelin virtaa ΔI verran. Jännitteen ja virran muutoksen suhde $\Delta U / \Delta I$ on paneelin sisäinen differentiaalinen resistanssi. Säädin vertaa sisäistä differentiaalista resistanssia paneelin staattiseen resistanssiin, joka puolestaan on paneelin jännitteen U ja virran I suhde U/I . Maksimitehon piste saavutetaan, kun paneelin sisäinen differentiaalinen resistanssi on yhtä suuri kuin sen staattinen resistanssi. Kun maksimitehon piste saavutetaan, pitää säädin paneelin virran ja jännitteen sen mukaisissa arvoissa vallitsevien olosuhteiden muutokseen asti. Olosuhteiden, kuten pilvisyyden muuttuessa, toistetaan säätöprosessi uudelleen. Tällä menetelmällä toiminnan värähtelyt ovat myös vähäisempiä kuin kokeile ja vertaa -menetelmässä. [6, s. 72–73.]

Virtapyyhkäisymenetelmässä säädin mittaa paneelin UI -käyrän säännöllisin aikavälein. Säädin muuttaa paneelien virtaa nopeaan tahtiin mittaamalla samalla jännitteen kullekin virran arvolle. Säädin laskee näistä virta- ja jännitearvopareista maksimitehon pisteen ja säätää kuormituksen sen mukaiseksi. [6, s. 73.]

Vakiojännitemenetelmässä oletetaan, että maksimitehon pisteen jännite on jokin tietty prosenttiosuus paneelin tyhjäkäyntijännitteestä U_{oc} , tyypillisesti noin 76 %. Säädin katkaisee paneelin virran hetkeksi, jolloin se mittaa paneelin tyhjäkäyntijännitteen. Paneelin jännite säädetään määritetyn prosenttiosuuden suuruiseksi mitatusta jännitteestä. Mittaus toistetaan aina olosuhteiden muuttuessa. Tämä menetelmä on kaikista yksinkertaisin, mutta samalla myös epätarkin. Määritetty prosenttiosuus ei välttämättä tuota maksimaalista tehoa kaikissa olosuhteissa. [6, s. 73.]

MPPT-säätimet ovat kalliimpia kuin pulssinleveysmodulaatioon pohjaavat perussäätimet. Niiden höytysuhde on kuitenkin huomattavasti korkeampi perussäätimiin verrattuna. Laadukkaiden MPPT-säätimien hinnat alkavat noin 80 eurosta. Verkkokaupoista voi löytää tunnettujen valmistajien säätimistä tehtyjä jäljitelmiä huomattavasti halvemmalla, mutta näiden suhteen kannattaa käyttää syvää harkintaa.

4.3 Invertteri

Invertteri eli vaihtosuuntaaja tekee aurinkopaneelien tuottamasta tasasähköstä vaihtosähköä paneelin jännitettä katkomalla, suurentamalla ja sen suuntaa vaihtamalla. Inverttereitä löytyy mm. 12 voltin ja 24 voltin järjestelmille. Suuritehoisissa järjestelmissä suurempi jännite on eduksi invertterin ottaman pienemmän virran vuoksi. Invertterin avulla aurinkosähköllä voidaan käyttää normaalisti pistorasian kautta verkkovirtaan kytkettäviä laitteita, kuten tietokonetta tai hiustenkuivaajaa. Jos aurinkosähköjärjestelmä liitetään jakeluverkkoon, tarvitaan aina invertteri, joka muuntaa paneelin jännitteen verkkoon sopivaksi 230 voltin vaihtojännitteeksi. Termi invertteri on lainattu englannin kielestä ja sitä käytetään myös yleisnimityksenä erityyppisille, kokoonpanoltaan toisistaan eroaville keskuslaitteille, joihin aurinkopaneelit kytketään. Tässä tekstissä invertterillä tarkoitetaan vaihtosuuntaajaa, jolla tasasähkö muutetaan vaihtosähköksi.

Invertterin tuottaman vaihtovirran laatua voidaan tarkastella sen tuottaman virran aaltomuotoa tutkimalla. Halvemmat yksinkertaiset invertterit tuottavat modifioitua siniaaltoista jännitettä. Sen kuvaaja poikkeaa huomattavasti sähköverkon puhtaasta siniaallon muotoisesta jännitteestä. Tästä voi aiheutua häiriöitä herkkiä laitteita, kuten tietokoneita, käytettäessä. Modifioitua siniaalloa tuottavat invertterit kuitenkin soveltuvat useimmille verkkovirtaan kytkettäville laitteille. Yksinkertaisen rakenteen ja toimintaperiaatteen vuoksi

voi löytää tämän tyyppisiä suuritehoisiaakin inverttereitä kohtuuhintaan. Kalliimmat ja laadukkaammat invertterit tuottavat puhdasta siniaaltoa. Puhdasta ja modifioitua siniaaltoa tuotetaan periaatteessa samalla menetelmällä, mutta puhtaan aallon tapauksessa invertteri pilkkoo virtaa tiheämmin siniaallon nousevan ja laskevan puolikkaan aikana. Puhdasta siniaaltoa tuottava invertteri myös säätelee virtapulssien kestoa siten, että pulssit ovat pidempiä puoliallon huippukohdissa. [6, s. 75–77; 4, s. 49–50.]

Hyvien inverttereiden hyötysuhde on 90:n %:n luokkaa. Modifioitua sinijännitettä tuottavat invertterit käyttävät itse vähemmän virtaa kuin puhdasta sinijännitettä tuottavat, joten edeltävien hyötysuhde on jonkin verran jälkimmäisiä parempi. Akkukäytössä tehokkaat invertterit ottavat akulta huomattavan suuren virran. Tämän vuoksi invertteri ja akku on suositeltavaa kytkeä toisiinsa lyhyillä ja paksuilla kaapeleilla. Suuri virta aiheuttaa pitkissä kaapeleissa suuren jännitehäviön, jolloin invertterin hyötysuhde kärsii. Invertteri myös katkaisee virran akun jännitteen pudotessa katkaisurajalle. Pitkien kaapeleiden aiheuttama jännitteen alenema voi johtaa virran ennen aikaiseen katkaisuun, sillä invertteri näkee akun jännitteen kaapelien jännitehäviön verran pienempänä.

Pienitehoiset invertterit kytketään yhteen vaiheeseen. Suurempitehoiset, noin 3 kW ylöspäin, voidaan kytkeä kolmeen vaiheeseen. Yksivaiheisen invertterin avulla voidaan luonnollisesti kuormittaa vain sitä vaihetta, johon invertteri on kytketty. Vaiheen valinnassa kannattaa ottaa huomioon laitteet, jotka kyseiseen vaiheeseen on liitetty. Jotta aurinkosähköstä saataisiin maksimaalinen hyöty, on laitteiden oltava sellaisia, että niiden käyttö voidaan ajoittaa valoisaan aikaan. Kolmivaiheista invertteriä käytettäessä on hyvä pyrkiä kuormittamaan vaiheita tasaisesti. Sähkökiukaat ja lämminvesivaraajat ovat hyviä kohteita, sillä ne kytketään tyypillisesti kaikkiin kolmeen vaiheeseen. Invertterin täyttäessä jakeluverkkoyhtiön vaatimukset voidaan se liittää jakeluverkkoon. Tällöin ylimääräisähköä voi myydä sähköyhtiölle. Verkkoon myydystä sähköstä maksetaan tyypillisesti vain sähköenergian hinta, joka on pienempi kuin verkosta ostetun sähköä kokonaishinta, johon kuuluvat energian hinnan lisäksi siirtomaksu ja verot. Tämän vuoksi aurinkosähköstä on parempi kuluttaa mahdollisimman paljon itse. [6, s. 78–80.]

4.4 Kaapelit

Kaapelin oikealla mitoituksella varmistetaan aurinkosähköjärjestelmän turvallisuus ja minimoidaan siirtohäviöitä. Suurilla virroilla alimitoitettut kaapelit ovat paloturvallisuusriski. Riittävän poikkipinta-alan lisäksi oikean kaapelityypin valinta on tärkeää. Tavallinen sisäasennuksiin soveltuva johto, kuten esimerkiksi MMJ, ei sovellu ulkoasennuksiin tai maahan kaivettavaksi. Paneelien asennuksissa on käytettävä ulkoasennuksiin soveltuvaa, UV-säteilyn kestävästä kaapelia, kuten AJMY:ä. Jos kaapeli kaivetaan maahan, tulee käyttää maakaapelia, kuten MCMK:ta. Ylimoitettun kaapelin huonona puolena on korkea hinta. [7, 56–57.]

Kaapelin paksuuden mitoitukseen vaikuttavia seikkoja ovat kuormitusvirta, kaapelin pituus ja suurin sallittu jännitehäviö. Pienillä jännitteillä, kuten 12 V tai 24 V, johdoissa syntyvän jännitehäviön merkitys kasvaa huomattavasti verrattuna normaalin verkkojännitteen systeemeihin verrattuna. Johtojen tehohäviöt ovat verrannollisia virran toiseen potenssiin. Jakeluverkon 230 voltin jännitteellä virrat ovat parhaimmillaan 20 kertaa pienempiä kuin 12 voltin järjestelmissä. Tämä tarkoittaa 12 voltin systeemeissä noin 400 kertaisia johtojen tehohäviöitä jakelujännitteeseen verrattuna. Kiinteistöjen kiinteissä 230 voltin asennuksissa käytetään aina poikkipinta-alaltaan vähintään 1,5 mm² johdinta. Edellä mainitun kaltaista johdinta voidaan kuormittaa 10 ampeerin virralla. Tällöin johtoon kytkettävän laitteen maksimiteho voi olla 230 V kertaa 10 A, eli 2,3 kW. Suuremmilla virroilla johdin kuumenee liikaa ja sen vuoksi on valittava poikkipinta-alaltaan paksumpi johdin. Verkkojännitettä matalammilla jännitteillä johtimien virtakestoisuus ei muutu. Jos systeemin jännite on 12 V ja käytetään 1,5 mm² johdinta, maksimikuormitusvirta on edelleen 10 A. Tämä puolestaan tarkoittaa, että johdon päähän kytkettävän laitteen maksimiteho on 12 V kertaa 10 A, eli 120 W. Matalalla jännitteellä johtojen maksimivirralla kuormittaminen ei kuitenkaan ole todennäköisesti järkevää jännitehäviöiden noustessa lyhyilläkin johdoille kohtuuttoman suuriksi. Taulukossa 1 on esitetty eri pinta-alaisten johtimien virrankeston maksimiarvoja.

Taulukko 1. Taulukkoarvoja kaapelin valintaan [7, s. 56].

Virta(A)	Tarvittava poikkipinta-ala(mm ²)	Esimerkki käyttökohteet
5	0,75	Pienet LED-valaisimet
10	1,5	Valaisimet
16	2,5	Tupakansytytinpistoke
25	4	Erikoispistorasia, jää- kaappi
50	8	Invertterikäyttö
100	16	Invertterikäyttö
200	32	Invertterikäyttö

Käytettäessä matalaa jännitettä on johtimissa syntyviin jännitehäviöihin kiinnitettävä erityistä huomiota ja ne on pyrittävä minimoimaan mahdollisuuksien mukaan. Hyviä viitearvoja sallituille jännitehäviöille ovat:

- paneelilta lataussäätimelle tulevissa johdoissa 0,5–1 V
- säätimeltä akkuun tulevissa johdoissa 0,1 V
- säätimeltä kulutuspisteille tulevissa johdoissa 0,5 V
- akulta invertterille tulevissa johdoissa 0,1 V.

Johtimen jännitehäviön voi laskea johtimen vastusarvon ja sen läpi kulkevan virran tulona. Johtimen vastusarvoon vaikuttaa johtimen pituus, pinta-ala ja johtimen materiaali. Myös johtimen lämpötila vaikuttaa sen vastuksen arvoon. Korkeammissa lämpötiloissa johtokyky heikkenee ja jännitehäviöt kasvavat. Lämpötilan vaikutus ei normaalisti ole kovin suuri ja voidaan yksinkertaisissa tapauksissa jättää huomioimatta.

Seuraavalla yksinkertaisella kaavalla voidaan laskea tarvittava johdin poikkipinta-ala aurinkopaneelikaapeleille ja pienitehoisille kulutuspisteille:

$$Poikkipinta - ala(mm^2) = L \times I \div 16 \quad (1)$$

L on johtimen pituus

I on johtimen mitoitusvirta.

Tarkempi laskentatapa on laskea johtimen resistanssi ja sitä kautta selvittää jännitehäviö.

Johtimen resistanssi saadaan laskettua kaavalla:

$$R = \left(\rho \times \frac{1}{A} \right) \times (1 + ltk \times (t - 20)) \quad (2)$$

R on kaapelin resistanssi

ρ on johtimen resistiivisyys, kuparille 0,017

A on johtimen poikkipinta – ala, mm²

ltk on lämpötilakerrkoin, kuparille 0,0039

t on johtimen lämpötila.

Kuten edellä on mainittu, jännitehäviö saadaan kertomalla kaavalla 2 laskettu johtimen resistanssi johtimen kuormitusvirralla. Saatua jännitehäviön arvoa voidaan verrata em. jännitehäviöiden maksimiviitearvoihin ja tehdä mitoitus päätöksiä tulosten mukaisesti. Jännitehäviöitä voidaan vähentää johtimen poikkipinta-alaa kasvattamalla tai jännitettä kasvattamalla. Johtimet on pyrittävä pitämään myös mahdollisimman lyhyinä. Pohdinnan arvoista on myös 24 voltin käyttäminen 12 voltin sijaan, jos se on käytön kannalta mahdollista. Kaksinkertaisella jännitteellä kuormitusvirrat puolittuvat ja jännitehäviöt putoavat neljäsosaan matalamman jännitteen vastaavista.

Helposti saatavilla olevia tavallisia sähköasennuskaapeleita voidaan hyödyntää asennuksissa. Niiden jännitekestoisuus on tyypillisesti 230 V, joten ne soveltuvat hyvin myös matalammilla jännitteillä käytettäväksi. Vaihtoehtoisesti voidaan myös hyödyntää autoihin tarkoitettuja kaapeleita. Näiden jännitekestoisuus riittää noin 75 volttiin asti.

MMJ on hyvin yleinen sisäasennuskaapeli. Sen johtimet ovat yksilankaista kuparia ja kaapelissa on tyypillisesti kolmesta viiteen johdinta. Johtimien poikkipinta-ala on 1,5–25 mm². Kaapelit ovat itsestään sammuvia. Johdon ulkovaippa on PVC-muovia, joka ei kestä auringon UV-säteilyä suojaamatta. MKMJ on MMJ:tä vastaava monisäikeinen kaapeli, jota on monisäikeisyyden vuoksi helpompi taivuttaa. MCMK ja AMCMK ovat tyypillisiä maakaapeleita. AMCMK-johtimet ovat alumiinia. MK90-johtimet ovat yksittäisiä muovieristeisiä ja monisäikeisiä kuparijohtimia, joiden pinta-ala on 1,5–16 mm². Autosähkökaapeleita ovat mm. AJMY, RKUB ja RKKB. Näitä on saatavilla autotarvikeliikkeissä. Kuvassa 10 on esitetty tavallisimmista asennuskaapeleista aurinkopaneelikaapeli AJMY MC4-liittimillä, MMJ 5x1,5S pinta-asennuskaapeli sekä MCMK 4x2,5+2,5 maakaapeli.

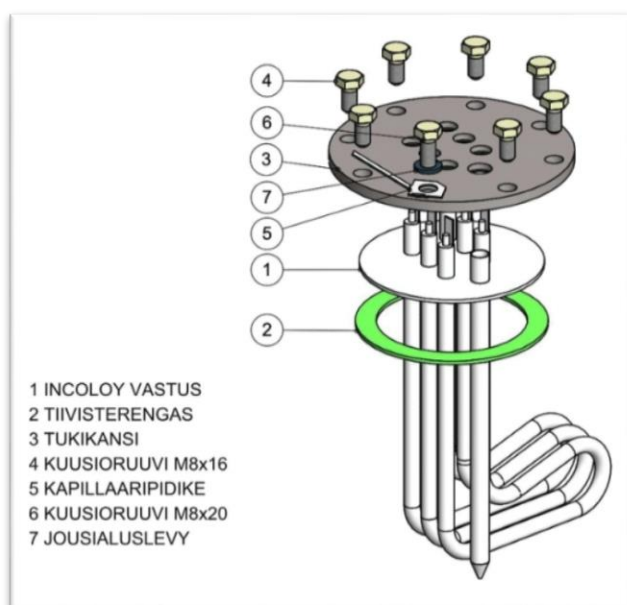


Kuva 10. Tavallisia asennuskaapeleita. Vasemmalta oikealle AJMY MC4 liittimillä, MMJ 5x1,5S pinta-asennuskaapeli sekä MCMK 4x2,5+2,5 maakaapeli [20].

Suhteessa halvan hinnan ja helpon saatavuuden vuoksi kannattaa edellisissä luvuissa mainittuja kaapelityyppejä hyödyntää mahdollisimman paljon. Aurinkosähköjärjestelmän tasasähkölle riittää kaksi johdinta. Esimerkiksi MMJ-kaapelissa on kolmesta viiteen johdinta. Kaikki osajohtimet voidaan kuitenkin hyödyntää rinnan kytkemällä. Rinnan kytkettyjen plus- ja miinusjohtimien lukumäärän ei tarvitsi olla sama. Viisijohtimisen MMJ-kaapelin kolme johdinta voidaan esimerkiksi kytkeä yhdeksi plus-johtimeksi ja loput kaksi miinus-johtimeksi. On muistettava, että sisäasennuskaapelit eivät sovellu ulkoasennuksiin, vaan on käytettävä esimerkiksi UV-suojattua AJMY-kaapelia. [6, s. 95–104; 7, s. 56–60.]

4.5 Varaaja ja varaajan vastus

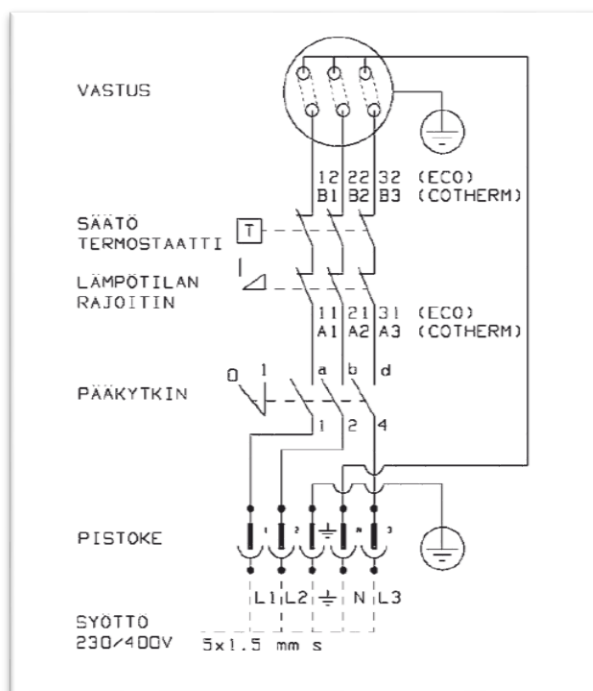
Sähköllä lämmitettävissä omakotitaloissa on yleensä erillinen varaaja lämpimälle käyttövedelle. Varaajan säiliö on tavallisesti kokoluokaltaan 200–300 litraa. Varaajan vesi lämmitetään varaajaan upotetuilla tai sen ympärille asennetuilla sähkövastuksilla. Sopiva vastusteho tämän kokoisille varaajille on kolmesta kilowatista kuuteen kilowattiin. Vastuspaketit ovat tavallisesti kolmivaiheisia ja koostuvat kolmesta kuparisesta vastuskierukasta. Esimerkiksi Jäspín valmistamassa VLM-300 S -varaajassa on vastuspaketti, joka koostuu kolmesta 1 kW:n vastus silmukasta. Edellä mainitun varaajan vastuspaketti on esitetty kuvassa 11. Vastuspakettiin kuuluu myös anturitasku veden lämpötilan seuranta varten. [21, s. 367–372.]



Kuva 11. Jäspín valmistaman VLM-300 S -lämmivesivaraajan 3 kW:n vastuspaketti [22].

Vastukset kytketään tavallisesti 230 V:n tai 400 V:n vaihtojännitteeseen. Kytkeä tehdään usein säiliön ulkopuolelle jäävään koteloon. Vastusta ohjaa termostaatti. Kytkeeseen kuuluu myös lämpötilanrajoitin, joka varmistaa, ettei vesi ylikuumene, vaikka termostaatti jostain syystä pettäisi. Lämmivesivaraajan säiliössä ei usein ole varattua läpivientä ohjaustermostaatille. Tällöin on valittava termostaatilla ja lämpötilanrajoittimella varustettu vastus. Kuvassa 12 on esitetty VLM-300 S -vastuksen kytkentä. Kaaviosta

nähdään, että kytkentään kuuluu muun muassa termostaatti sekä lämpötilanrajoitin. [21, s. 367–372.]



Kuva 12. Jäspin valmistaman VLM-300 S:n lämminvesivaraajan kytkentäkaavio [23].

Varaajaa voidaan syöttää aurinkosähköjärjestelmällä, johon kuuluu invertteri. Tällöin paneelien tuottama tasavirta muutetaan varaajalle sopivaksi vaihtosähköksi. Invertteri on kuitenkin kallis komponentti. Työtä varten on varaajien valmistajilta ja jälleenmyyjiltä kysely mahdollisuutta varaajan syöttämiseen tasavirralla. Vastausten perusteella näyttää siltä, että tätä vaihtoehtoa ei olla otettu huomioon eikä valmiita ratkaisuita ole tarjolla. Huolenaiheena, varaajaa tasavirralla syötettäessä, on vaihtovirralla tarkoitetun termostaatin kesto. Vaihtovirralla tarkoitetussa termostaatissa voi tapahtua läpilyöntejä, jotka vaurioittavat termostaattia tai jopa rikkovat sen. Suomen markkinoilla ei juurikaan näytä olevan ratkaisuja tasavirralla lämmitystä varten. Verkkokauppoja tutkimalla löytyi joitakin esimerkkejä tasavirralla tarkoitetuista vastuksista. Kuvassa 13 on amerikkalaisen valmistajan Missouri Wind and Solar LLC valmistama termostaattilinen DC-vastus.



Missouri Wind and Solar © 2019

Kuva 13. Missouri Wind and Solarin valmistama tasavirtalämmitysvastus, jossa sisäänrakennettu säädettävä termostaatti [24].

Veden lämmitystä aurinkosähkön avulla suunniteltaessa on myös otettava huomioon vastuksen resistanssi. Varaajan vastukset on tyypillisesti mitoitettu 230 V:n tai 400 V:n vaihtojännitteelle. Ohmin lain mukaisesti 2000:n watin ja 230 voltin vastuksessa resistanssi on noin 26,5 ohmia. Jos edellä mainitun mukaista vastusta kuormitetaan esimerkiksi 48 voltin aurinkosähköjärjestelmällä, jää virta alle kahteen ampeeriin. Tällöin systeemin teho jää häviävän pieneksi. Aurinkosähköjärjestelmän jännitettä on siis nostettava lähelle 230 voltia sarjaan kytkennällä tai on löydettävä huomattavasti ohmi-arvoltaan pienempi vastus.

Taulukossa 2 on laskettu ohmin lain perusteella vastuksen resistanssin arvoja eri jännitteisille ja tehoisille systeemeille.

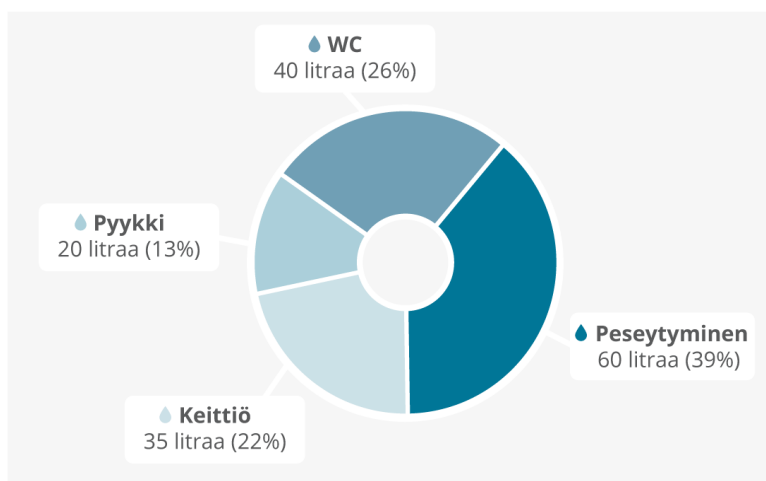
Taulukko 2. Sopivia lämmitysvastuksen resistanssiarvoja eri tehoisille järjestelmille.

Jännite V	Teho W	Resistanssi Ω	Virta A
230	3500	15,11	15,22
230	2000	26,45	8,70
230	1500	35,27	6,52
230	1000	52,90	4,35
120	2000	7,20	16,67
120	1500	9,60	12,50
120	1000	14,40	8,33
48	2000	1,15	41,67
48	1500	1,54	31,25
48	1000	2,30	20,83

5 Lämpimän käyttöveden tuottaminen ja kulutus

Veden kulutus

Suomessa veden kulutus vuorokausitasolla on noin 140 litraa vuorokaudessa henkilöä kohden [25]. Kulutuksen määrä voi kuitenkin vaihdella huomattavasti mm. kulutustottumuksien ja vesikalusteiden varustelutason mukaan. Lämpimän käyttöveden osuus kokonaiskulutuksesta on noin 40 % [27]. Lämpimän käyttöveden suhteellinen osuus kokonaiskulutuksesta vaihtelee eri vuodenaikoina. Keväällä, kesällä ja syksyllä kulutetaan lämmintä käyttövettä vähemmän kuin talvella. Kokonaiskulutuksesta keskimäärin 40-60 % käytetään suihkussa, 20-30 % keittiössä ja 20-35 % WC:ssä [21, s.248]. Kuvassa 14 on esitetty kotitalouden vedenkäytön jakautuminen kulutustyypeittäin.



Kuva 14. Vuorokauden vedenkulutuksen jakaantuminen [26].

Lämmintä käyttövettä kuluu noin 40-50 litraa vuorokaudessa per henkilö. Lämpimästä käyttövedestä noin kaksi kolmasosaa kuluu henkilökohtaiseen hygieniaan, neljäsosa astioiden pesuun ja loput muihin tarpeisiin. Veden lämmitykseen käytetty energia on noin viidennes asuinkiinteistöjen kokonaisenergian kulutuksesta. [26.]

Suuret kulutuksen vaihtelut ovat tyypillisiä lämpimälle käyttövedelle. Arkisin kulutus huippu ajoittuu yleensä aamuun ja iltaan. Viikonloppuna kulutus on tyypillisesti tasaisempaa. Huippukulutuksen käyttöaika ilmaisee ajan, jolla päivittäinen huippukulutus vastaa

todellista vaihtelevaa päivittäistä kulutusta. Mitä pienempi huippukulutuksen käyttöaika on, sitä vaihtelevampaa on päivittäinen kulutus. [21, s. 247–248.]

Veden lämmitykseen kuluva energia

Asuinkiinteistön energiankulutuksesta noin viidennes menee käyttöveden lämmittämiseen. Itse veden lämmityksen lisäksi lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöt lisäävät energian tarvetta. Vanhoissa kiinteistöissä kiertojohdon lämpöhäviöt voivat olla huomattavankin suuria. Ulkolämpötilalla ei ole suurta vaikutusta käyttöveden lämmitykseen tarvittavaan energiaan. Lämpimän käyttöveden energiankulutuksena käytetään ensisijaisesti rakennuksen käyttöveden energiamittauksiin perustuvaa arvoa. Veden lämmitykseen kulunutta energiaa voidaan arvioida esimerkiksi kesä-elokuun keskimääräisen kulutuksen perusteella edellyttäen, että rakennuksen muu lämmitys ei ole tuona aikana päällä. Jos lämpimän käyttöveden kulutuksesta on tarkempaa mittaustietoa, voidaan lämmitykseen käytetty energia laskea kaavalla:

$$Q = \frac{\rho \times c_p \times V \times (t_2 - t_1)}{3600} \quad (3)$$

Q on veden lämmittämiseen kuluva energia (kWh)

ρ on veden tiheys $\left(1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

c_p on veden ominaislämpökapasiteetti

V on veden kulutus (m^3)

t_2 on lämmitetyn veden lämpötila

t_1 on lämmitettävän veden lämpötila.

Lämpimän käyttöveden kulutukseen ja sen vaatimaan energiamäärään arviointiin on myös muita tapoja kuin edellä mainitut. Esimerkiksi Motivan verkkosivuilta löytyy tapoja kulutusarvioiden tekemiseen. [27; 28.]

6 Käyttöveden lämmityksen kannattavuus aurinkosähköllä

6.1 Kannattavuustekijät

Aurinkosähköjärjestelmän kannattavuus koostuu kolmesta osatekijästä. Ensimmäinen tekijä on järjestelmästä saatava rahallinen hyöty, kuten korvatut ostoenergiakulut, energian myynti ja mahdollinen kiinteistön arvon nousu. Toinen tekijä on järjestelmään upotettavat investointi- ja rahoituskulut. Kolmas osatekijä on järjestelmästä koituvat huoltokulut sen elinkaaren aikana. Osatekijöillä on suoria tai välillisiä vaikutuksia keskenään. Aurinkosähköjärjestelmän toteutukseen liittyy kohdekohtaisia kiinteitä kustannuksia. Näitä ovat esim. osa asennukseen liittyvistä kustannuksista, invertteri, säädin, johdot ja johtoreitit. Pienemmissä järjestelmissä näiden kiinteiden kustannusten suhteellinen osuus voi olla hyvinkin merkittävä. Jos paneelistoa voidaan kasvattaa ilman, että nämä kiinteät kustannukset merkittävästi kasvavat, voi järjestelmän ylityöittäminen omaan tarpeeseen nähden olla kannattavaa. Tässä tapauksessa ylityöituksen kannattavuus perustuu investoinnin matalampaan €/kW yksikköhintaan, jolloin tuotetun energiayksikön €/kWh hintakin laskee. Itsetuotetun energian hinnan suhde aurinkosähköjärjestelmällä korvattavan ostoenergian hintaan on kannattavuustarkastelun keskiössä. Suuremmalla alkuinvestoinnilla saadaan kasvatettua korvattavan ostoenergian osuutta samalla matalalla itsetuotetun energian hintaa. Myös esimerkiksi Finsolarin verkkosivuilta löytyvät järjestelmien kannattavuustarkastelut puhuvat suurempien järjestelmien skaalausedun puolesta. Suuremmilla järjestelmillä saavutetaan huomattavasti matalampi €/kWp kustannusarvo. [29; 30, s. 42–44.]

Aurinkosähköjärjestelmän kannattavuuden tarkastelussa kohdekohtainen analyysi on välttämätöntä. Markkinointilupaukset tiettyä asennettua kattopinta-alan tai paneeliston tehoa kohden saatavista vuosituotoista eivät ole riittäviä. Kriittisessä kohdekohtaisessa tarkastelussa otetaan huomioon monia seikkoja. Kuinka suuri on järjestelmän investointihinta, eli kuinka suuret ovat kaikki järjestelmän käyttöönottoon liittyvät kustannukset? Mitkä ovat huolto- ja korjauskustannukset järjestelmän elinkaaren aikana? Esimerkiksi invertteri on uusittava 15–20 vuoden välein, joten se on uusittava järjestelmän elinkaaren aikana vähintään kerran. Jos investointi maksetaan lainarahalla, mikä on korkokanta? Mikä on aurinkoenergialla korvattavan ostosähkön hinta? Minkälaista on ostosähkön hin-

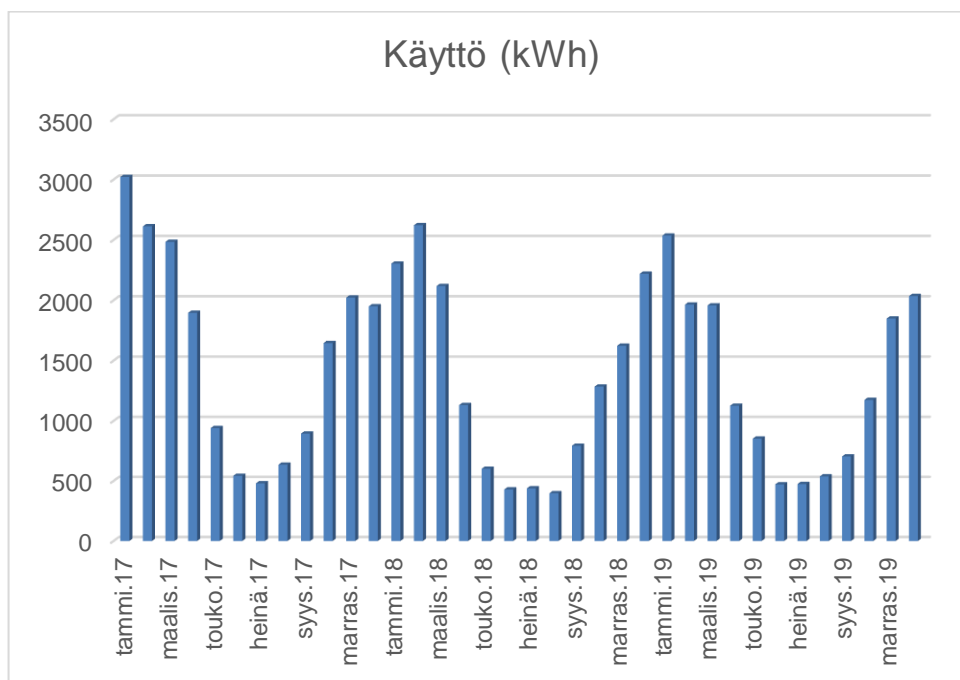
nan kehitys? Esimerkiksi viime vuosina sähkön siirtohinnot ovat olleet paikoittain rajusakin nousussa. Caruna on ollut mediassa paljon esillä siirtohintojen korotusten vuoksi. Suomen nykyinen hallitus on kuitenkin reagoinut hintakehitykseen siirtohintojen nousua hillitsemään tähtäävällä lakiluonnoksella. Kuinka suuri on paneeliston tuotannon lasku sen elinkaaren aikana? Usein tuotannon laskun arviona käytetään 1 % vuodessa. Mikä on järjestelmän vuosituotto? Vuosituottoon vaikuttavat maantieteellinen sijainti, tontin varjostukset, paneelien asennuskulmat ja suuntaus sekä asennustapa. Jos kyseessä on verkkoon liitetty järjestelmä, kuinka suuri on verkkoon myydystä energiasta saatava korvaus? Mikä osuus tuotetusta energiasta saadaan käytettyä itse? Mitä suurempi osa järjestelmän tuotosta saadaan omaan käyttöön, sen kannattavampi järjestelmä yleisesti on. [3, s.93–97; 31.]

6.2 Esimerkkikohde ja lähtöoletukset

Kohde

Laskennoissa esimerkkikohteena on käytetty Helsingin Konalassa sijaitsevaa asuinpinta-alaltaan noin 140 m² omakotitaloa. Oletuksena on, että kohteessa ei ole suuria varjostusta aiheuttavia esteitä ja että auringonsäteily pääsee esteettä katolle asennettuihin paneeleihin. Katon jyrkkyydeksi ja näin myös paneelien asennuskulmaksi arvioidaan 45 astetta. Paneelien suuntauksen oletetaan olevan karkeasti lounaista kohti. Kohteessa on 300 litran lämminvesivaraaja 3 kW:n vastuspaketilla varustettuna.

Esimerkkikohteesta on saatavilla kuukausikohtaiset energiankulutustiedot vuosille 2017–2019, jotka on esitetty kuvassa 15.



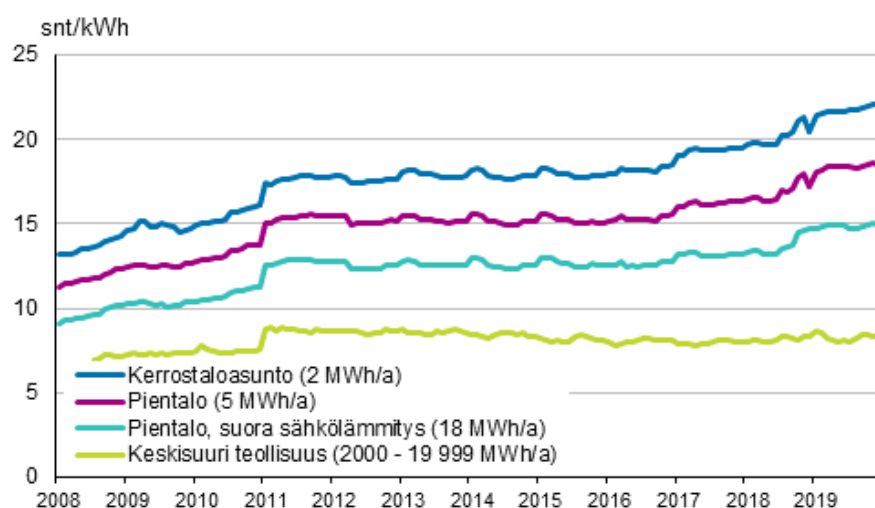
Kuva 15. Esimerkkikohteen energiankulutuksen jakautuminen kuukausittain vuosina 2017–2019.

Vedenlämmitykseen kuluva energia arvioidaan heinäkuun kulutuksen pohjalta. Kolmen vuoden jaksolla heinäkuun keskimääräiseksi kulutukseksi saadaan 464 kWh. Tästä

vähennetään arvioitu kylmälaitteiden energian kulutuksen osuus kuukauden osalta. Kylmälaitteiden kulutukseksi arvioidaan 1,2 kWh päivässä. Näin vedenlämmitykseen kuluva energiaksi saadaan pyöristettynä 425 kWh/kk. Arvio saattaa olla yläkanttiin, sillä esimerkiksi Vattenfallin sivuilta löytyvät, Adaton 2011 tekemään kotitalouksien sähkönkäyttötutkimukseen perustuvat, luvut antavat vedenlämmityksen kulutusarvioksi 365 kWh/vrk. Adaton laskemissa oletuksena oli 4 hengen kulutus 150 m² sähkölämmitteisessä omakotitalossa. Lämmintä käyttövettä kuluu tavallisesti hieman enemmän talvella kuin kesällä. Laskelmissa oletetaan kuitenkin kulutuksen jakautuvan tasaisesti vuoden ajalle. Laskelmissa vedenlämmityksen energiankulutukselle käytetään arvoa 425 kWh/kk. [32; 21, s.247.]

Korvatusen ostoenergian hinta ja hinnan kehitys

Kuvassa 16 on esitetty sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. Hinnat sisältävät sähköenergian, siirtomaksun ja verot.



Kuva 16. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin [34].

Esimerkkikohde on pientalo suoralla sähkölämmityksellä, eli laskelmissa käytetään korvattavalle ostosähkölle hintaa 15 snt/kWh. Sähkön kuluttajahinnan kehitystä on vaikea arvioida aurinkosähköjärjestelmän elinkaaren ajalle. Laskelmissa käytetään arviona 2 % vuotuista hinnan korotusta.

Kohteen tuotto odotukset

Kohteeseen asennettavan aurinkosähköjärjestelmän tuotto-odotuksia on arvioitu Euroopan komission ylläpitämällä PVGIS-työkalulla. Työkalun avulla on haettu arviot kuukausittaisista energian määristä kilowattitunteina paneelineliometriä kohden vuosilta 2005–2016 esimerkkikohteen sijainnille. Arvot on laskettu paneelien kallistuskulmalle 45 astetta. Työkalu olettaa, että paneelit on suunnattu päiväntasaajaa kohti. Esimerkkikohteessamme oletamme kuitenkin, että paneelit suunnataan lounaaseen. Tämä suuntaus on epäedullisempi etelää kohti suunnattuihin paneeleihin verrattuna. Laskennassa poikkeama optimiasennuskulmasta pyritään huomioimaan heikentyneenä energian talteen saantina. Seuraavassa taulukossa 3 on esitetty kuukausittaiset keskiarvot säteilyenergiasta esimerkkikohteessa.

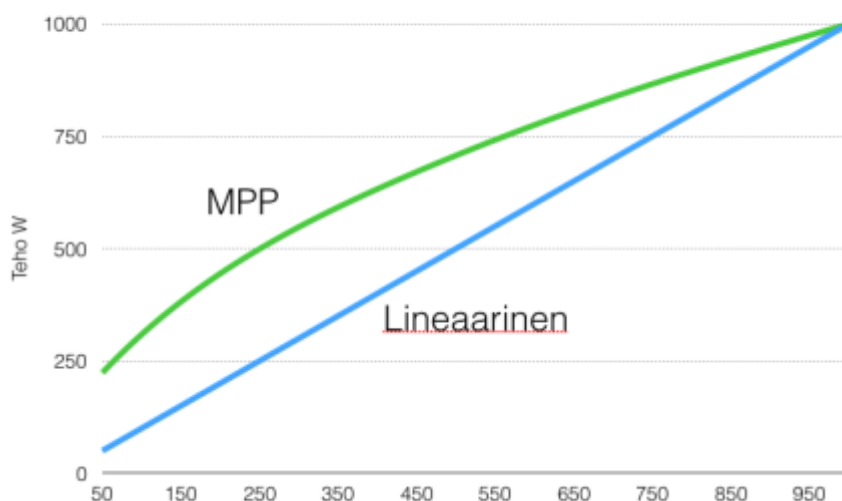
Taulukko 3. Kuukausittaiset keskiarvot säteilyenergiasta esimerkkikohteessa. [11.]

Kuukausi	H(i)_m [kWh/m ² /kk]	Päivien määrä kuukaudessa	H(i)_d [kWh/m ² /vrk]
tammi.	16,05	31	0,52
helmi.	35,55	28	1,27
maalis.	89,82	31	2,90
huhti.	128,00	30	4,27
touko.	172,68	31	5,57
kesä.	169,46	30	5,65
heinä.	177,21	31	5,72
elo.	148,30	31	4,78
syys.	100,49	30	3,35
loka.	58,32	31	1,88
marras.	19,03	30	0,63
joulu.	10,07	31	0,32

Kuukausittaiset keskiarvot on laskettu vuosien 2005–2016 ajalta. Kuukausittaisista keskiarvoista on laskettu vuorokausikohtaiset energian tuotto-odotukset jakamalla kuukauden tuotto kuukauden päivien lukumäärällä. Laskennassa käytetään taulukon 3. vuorokausikohtaisia energiantuoton odotusarvoja, jotka löytyvät sarakkeesta H(i)_d. [11.]

Aurinkopaneelit toimivat epälineaarisesti kuten diodit. Kuten MPPT-säätimiä käsittelevässä kappaleessa aikaisemmin kerrottiin, aurinkopaneeleille löytyy säteilyintensiteetistä riippuva virran ja jännitteen suhde, jolla paneelista saadaan irti suurin mahdollinen

teho. Kun paneelistoon kytketään suoraan resistiivinen kuorma kuten varaajan vastus, saadaan optimaalinen teho vain yhdellä valaisuintensiteetillä. Tämän vuoksi, kytkettäessä paneelit suoraan lineaarisesti käyttäytyvään puhtaasti resistiiviseen kuormaan, voi suuri osa potentiaalisesta tuotannosta mennä hukkaan. Hyödyntämättä jääneellä tuotannolla on huomattava vaikutus järjestelmän takaisinmaksu-aikaan. Tämän vuoksi ratkaisu, johon sisältyy MPPT-toiminnallisuus, on suositeltava. Kuvassa 17 on vertailtu lineaarisesti käyttäytyvästä systeemistä ja MPP-periaatteella toimivasta systeemistä ulos saatavan tehon käyttäytymistä eri valaistusintensiteeteillä.



Kuva 17. Lineaariseen kuormituksen ja MPP:n vertailu [16].

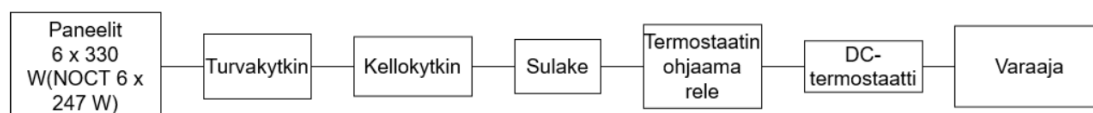
Kuvasta 17 huomataan että lineaarisesti käyttäytyvällä systeemillä menetetään merkittävä määrä tehosta, jos auringon säteily ei ole maksimaalista. Vuositasolla lineaarisesti kuormitetun systeemin tuottama energia voi olla puolet heikompi kuin MPP-toiminnolla varustetun systeemin. [16].

Aurinkosähköjärjestelmät

Tässä työssä aurinkosähköjärjestelmät kuvataan karkealla tasolla. Laskennat tehdään kahdelle eri systeemille. Kummankaan systeemin ei ajatella olevan liitettynä jakeluverkkoon. Ensimmäinen systeemi on hyvin kevyt ratkaisu, jossa paneelit yhdistetään suoraan varaajaan, ilman väliin kytkettävää invertteriä tai ohjaussäädintä. Toiseen systeemiin kuuluu invertteri, jossa on integroitu MPPT-säädin.

Suora kytkentä varaajaan

Kuvassa 18 on järjestelmäkaavio ratkaisusta, jossa ei ole invertteriä.



Kuva 18. Järjestelmän 1. komponentit.

Järjestelmään kuuluu paneelien lisäksi turvakytkin, kellokytkin, jolla varmistetaan paneelien toiminta vain päivän aikana, sulake, DC-termostaatti ja termostaatin ohjaama rele. DC-termostaatilla varmistetaan, että veden lämpötila ei nouse yli asetetun arvon. Veden lämpötilan noustessa asetettuun arvoon katkaistaan syöttö termostaatin ohjaamalla releellä. Ensimmäisessä ratkaisussa käytetään Amerisolarin 330 W HC PERC aurinkopaneeleita. Kuvassa 19 on listattu paneelien sähköisiä ominaisuuksia ns. normaalikäytön olosuhteissa eli NOCT-olosuhteissa.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT NOCT					
Maximum Power (P_{max})	235W	239W	243W	247W	251W
Open Circuit Voltage (V_{OC})	37.0V	37.2V	37.4V	37.6V	37.8V
Short Circuit Current (I_{SC})	8.15A	8.22A	8.29A	8.36A	8.43A
Voltage at Maximum Power (V_{mp})	30.2V	30.4V	30.6V	30.8V	31.0V
Current at Maximum Power (I_{mp})	7.79A	7.87A	7.95A	8.02A	8.10A

Kuva 19. Järjestelmässä 1. käytettävien paneelien sähköisiä ominaisuuksia [37].

NOCT-olosuhteet vastaavat Suomen oloja huomattavasti tarkemmin kuin standarditestin mukaiset olosuhteet, joille pätee edellä mainittu 330 watin nimellisteho.

Paneeleja valittaessa on siis kiinnitettävä huomiota missä olosuhteissa luvatut sähköiset ominaisuudet on määritetty, sillä Suomen oloissa paneelien maksimiteho 247 W on huomattavasti mainostettua 330 W pienempi. Järjestelmässä on 6 paneelia, jolloin kokonaistehoksi saadaan 1482 W. Sarjaan kytkettyjen paneelien jännite V_{mp} on 184,8 V. Virta maksimiteholla on 8,02 A. Tarkemmat tiedot paneelien sähköisistä ominaisuuksista löytyvät liitteestä yksi.

Järjestelmän komponenttien hinnat on pääasiassa arvioitu nordsolar.fi- sekä finnpartia.fi-verkkokauppojen hinnastojen pohjalta. Kuuden Armisolarin valmistaman aurinkopaneelin hinnaksi tulee 956 euroa, joka pyöristetään 1000 euroon toimituskulujen kattamiseksi. Paneelien kiinnikkeiden hintaa arvioidessa tutkittiin Oriman profiilipeltikiinnikkeitä. Kuuden paneelin asennukseen tarvittavien kiinnikkeiden yhteishinnaksi arvioidaan 400 euroa. Muiden sähköisten komponenttien kuten releen, termostaatin, kellokytkimen, turvakytkimen ja kaapeleiden yhteishinnaksi arvioidaan 300 euroa. Oletuksena on, että paneelien mekaaninen asennus tehdään itse, jolloin asennuskustannukset tulevat vain sähköisistä kytkennöistä. Asennuskustannukseksi ennen kotitalousvähennystä arvioidaan 750 euroa ja vähennyksen kanssa 550 euroa. Hintaan lisätään vielä 200 euron projektimarginaali odottamattomille kustannuksille. Näin kokonaisinvestointikustannukseksi saadaan 2450 euroa.

Valmis pakettiratkaisu invertterillä

Toinen järjestelmä arvioidaan nordsolar.fi-verkkokaupasta löytyvän valmiin pakettiratkaisun pohjalta [41]. Paketti sisältää seuraavat komponentit:

- 10 kpl 310 W PERC musta yksikideaurinkopaneeli
- Fronius Symo 3.0-3-S verkkoinvertteri
- 30 m solar kaapeli 2x6 mm²
- MC4 käsin liitettävä liitin, 1pari
- turvakytkin AC 500 V

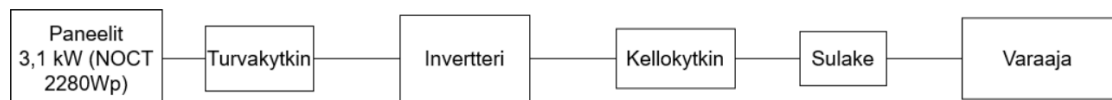
- varoitustarra, takasyöttövaara.

Järjestelmän nimellisteho on 3,1 kW. Tämäkin teho on kuitenkin määritetty standardiolosuhteissa. Kuvassa 20 on listattu paneelien sähköisiä ominaisuuksia NOCT-olosuhteissa.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT						OPERATING CONDITIONS	
TYPE	JAM60S01 -290/PR	JAM60S01 -295/PR	JAM60S01 -300/PR	JAM60S01 -305/PR	JAM60S01 -310/PR	Maximum System Voltage	1000V/1500V DC(IEC)
Rated Max Power(Pmax) [W]	213	217	221	224	228	Operating Temperature	-40°C~+85°C
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	36.34	36.57	36.75	36.95	37.15	Maximum Series Fuse	20A
Max Power Voltage(Vmp) [V]	29.56	29.63	29.69	29.90	30.18	Maximum Static Load,Front	5400Pa
Short Circuit Current(Isc) [A]	7.61	7.69	7.78	7.86	7.93	Maximum Static Load,Back	2400Pa
Max Power Current(Imp) [A]	7.21	7.32	7.43	7.50	7.55	NOCT	45±2°C
NOCT	Irradiance 800W/m², ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G					Application Class	Class A

Kuva 20. Järjestelmässä 2. käytettävien paneelien sähköisiä ominaisuuksia [38].

Jälleen huomataan, että Suomen oloja vastaavissa normaalikäytön oloissa paneeleista saatava maksimiteho on huomattavasti pienempi kuin markkinointimielessä ilmoitettu 310 W. Suomen oloissa järjestelmän kokonaisteho on lähempänä 2280 wattia. Sarjaan kytkettyjen paneelien jännite V_{mp} on 301,8 V. Virta maksimiteholla on 7,55 A. Tarkemmat tiedot paneelien sähköisistä ominaisuuksista löytyvät liitteestä kaksi. Seuraavassa kuvassa 21 on esitetty pakettiratkaisun järjestelmäkaavio.



Kuva 21. Järjestelmän 2. komponentit.

Paketin myyntihinta on 3182 euroa. Asennuksen hinnaksi arvioidaan 550 euroa kotitalousvähennyksen jälkeen. Toimituskulujen ja projektimarginaalin jälkeen arvio kokonaisinvestointihinnasta pyöristetään 4000 euroon.

6.3 Laskuri ja kannattavuuslaskennat

Kannattavuuslaskennat tehdään edellä esitetyille kahdelle järjestelmälle. Laskennassa käytetään Tekesin rahoittamassa ja Aalto-yliopiston kauppakorkeakoulun koordinoimassa FinSolar-hankkeessa laadittua riippumatonta laskuria. [33.]

Laskuri

Finsolar- aurinkosähkön kannattavuuslaskurit ovat Google Sheets -tiedostoon luotuja taulukkolaskimia. Laskureita on kaksi, joista toinen on tarkoitettu kannattavuuden karkeampaan arviointiin. Toinen on tarkempi aurinkosähkön mitoitustaulukko, jonka avulla voidaan arvioida, minkä kokoinen aurinkosähköjärjestelmä kiinteistöön sopii. Laskurit löytyvät Finsolarin verkkosivuilta, ja ne ovat vapaasti käytettävissä Creative Commons -lisenssin mukaisesti. Tämän työn laskelmat on tehty tarkemmalla laskurilla.

Laskureihin syötetään määritetyt lähtöoletukset. Laskuriin punaisella fontilla merkityt lähtötiedot ovat välttämättömiä laskennan suorittamiseksi. Sinisellä fontilla merkattuihin soluihin voidaan syöttää lisätietoja, joiden avulla laskelmista saadaan tarkempia ja luotettavampia. Laskennalle pakollisia lähtötietoja ovat:

- sähkön kuluttajahinta eli sähköenergian ja sähkön siirron ostohinta veroineen snt/kWh
- arvio ostosähkön hinnan noususta % per vuosi
- aurinkosähköjärjestelmän koko tehona Wp
- järjestelmän investointikustannus € (laitteet ja asennus, myös mahd. ALV)
- investointituki tai kotitalousvähennys alkuinvestoinnista, %
- investoinnin laskentakorko, esim. pankin korkokulu
- aurinkosähkön myyntihinta verkkoon snt/kWh

- auringon säteily kWh/m²/pv sijainnin mukaan esimerkiksi PVGIS-työkalulla määritettynä
- kiinteistön vuorokausikohtaisesta sähkönkulutuksesta maksimiosuus, jonka voi tuottaa omalla aurinkosähköllä %.

Laskelmia tarkentavia lähtötietoja ovat:

- invertterin vaihdon kustannus, % alkuinvestoinnista. Oletettu tapahtuvan kerran aurinkosähköjärjestelmän elinaikana 15. vuotena
- sähkön ostohinta €/MWh/kk
- aurinkosähköjärjestelmän hyötysuhde % (suhde, jolla säteily määrä saadaan talteen).

Laskelmissa otetaan huomioon myös paneelien tuotannon lasku sekä arvioitu sähkön hinnan nousu järjestelmän elinkaaren ajalta. Laskuri taulukoi tuotto- ja talouslaskelmat järjestelmän elinkaaren ajalta. Taulukosta nähdään muun muassa oma sähköntuotanto ja sen rahallinen arvo vuositasolla, kassavirta ja investoinnin nettonykyarvoja (NPV) valitulla laskentakorolla. Tärkeimpinä tuloksina voidaan pitää investoinnin nettonykyarvoa eli kokonaistuottoa tai -tappiota 30 vuoden käyttöiällä sekä järjestelmän takaisinmaksuaikaa. Liitteistä kolme ja neljä löytyvät esimerkit laskurin tekemistä investoinnin tuotto- ja kannattavuuslaskelmista.

Kannattavuuslaskelmat

Taulukossa 4 on lueteltu aikaisemmissa kappaleissa määritellyt laskennan lähtöarvot. Järjestelmällä 1 tarkoitetaan varaajaan suoraan kytkettyä paneelistoa ilman invertteriä. Järjestelmällä 2 tarkoitetaan valmista asennuspakettia, jossa on mukana invertteri.

Taulukko 4. Laskennassa käytetyt lähtöarvot järjestelmittäin.

Laskennan kohteena oleva järjestelmä	1.	2.
Sähkön kuluttajahinta eli sähköenergian ja sähkön siirron ostohinta veroineen snt/kWh	15,0	15,0
Arvio ostosähkön hinnan noususta % per vuosi	2,0%	2,0%
Aurinkosähköjärjestelmän koko tehona Wp	1482	2280
Järjestelmän investointikustannus € (laitteet ja asennus, myös mahd. ALV)	€2 450	€4 000
Investointituki tai kotitalousvähennys alkuinvestoinnista, %	0 %	0 %
Oma kiinteistöarvo-, brändi- tai ympäristötuki investoinnille €	€0	€0
Investoinnin laskentakorko, esim. pankin korkokulu	2,0%	2,0%
Aurinkosähkön myyntihinta verkkoon snt/kWh	0,0	0,0
Invertterin vaihdon kustannus, % alkuinvestoinnista. Oletettu tapahtuvan kerran aurinkosähköjärjestelmän elinaikana 15. vuotena.	0 %	30 %
Aurinkosähköjärjestelmän hyötysuhde % (suhde, jolla säteily-määrä saadaan talteen)	13 %	13 %
Kiinteistön vuorokausikohtaisesta sähkönkulutuksesta maksimiosuus, jonka voi tuottaa omalla aurinkosähköllä %	90 %	90 %

Invertterin sisältävässä järjestelmässä on oletettu, että laite uusitaan 15 vuoden käytön jälkeen. Uuden laitteen hinnaksi on arvioitu 30 % alkuperäisestä investointihinnasta, eli 1200 euroa. Kotitalousvähennys on huomioitu asennuksen hinnassa ja sen vuoksi sitä ei syötetä laskuriin.

Laskelmia tehdessä havaitaan, että hyötysuhteella voi olla dramaattinen vaikutus takaisinmaksuaikaan. Todellinen hyötysuhde on myös haastava määrittää. Taulukossa 5 on laskettuna takaisinmaksuaikoja kummallekin tarkastelussa olevalle järjestelmällä eri hyötysuhteilla.

Taulukko 5. Järjestelmien lasketut takaisinmaksuajat eri hyötysuhteilla.

Hyötysuhde %	Takaisinmaksuaika vuosina järjestelmälle 1.	Takaisinmaksuaika vuosina järjestelmälle 2.
13	11	13
12	12	15
11	13	18
10	15	19
9	16	22
8	19	25

Esimerkkikohteessa paneelit on suunnattu lounaista kohti, joka ei ole optimaalista järjestelmän energiantuotannon kannalta. Järjestelmässä 1 ei ole MPPT-ohjausta, jolloin tuotto on maksimaalista vain auringon paisteen ollessa esteetöntä ja kirkkaimmillaan. Tämän vuoksi tuskin päästään 13 %:n hyötysuhteeseen. Järjestelmän 1 arvioitu takaisinmaksuaika on tämän vuoksi noin 16–19 vuotta. Lineaarisesta kuormasta johtuva hukkaan menevä tuotanto voi kuitenkin heikentää järjestelmän kannattavuutta ja siten myös takaisinmaksuaikaa.

Järjestelmän 2 invertteri ja sen MPPT-ohjaussäädin parantavat järjestelmän tuottopotentiaalia. Asennuskulmalla on samaan tapaan tuottoa heikentävä vaikutus kuin järjestelmän 1 tapauksessa. Myös invertterin uusiminen heikentää järjestelmän kannattavuutta. Järjestelmän 2 arvioitu takaisinmaksuaika on noin 15–18 vuotta.

7 Luvat ja sopimukset

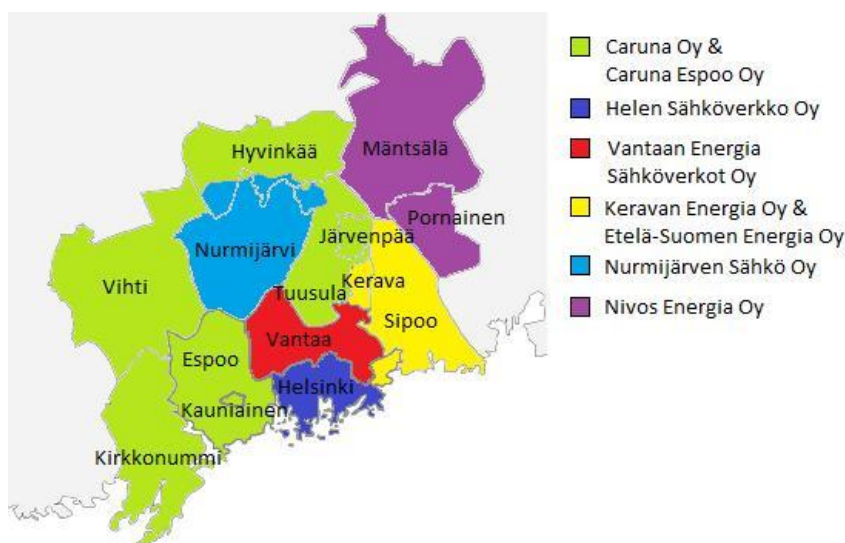
7.1 Toimenpidelupa ja rakennuslupa

Vuoden 2017 toukokuussa voimaan astuneen uudistuneen maankäyttö- ja rakennuslain mukaan aurinkoenergian pienrakentaminen on pääasiallisesti vapautettu luvanvaraisuudesta. Lain mukaan esimerkiksi oman talon katolle tai omalle tontille saa asentaa aurinkopaneeleja ilman kunnan rakennusviranomaiselta pyydettyä toimenpidelupaa, kunhan asennus ei merkittävästi muuta kaupunkikuvaa tai ympäristöä. Helsingin, Vantaan, Espoon ja Kauniaisten kaupunkien rakennusjärjestyksissä paneelien asennus on vapautettu toimenpideluvan piiristä. Asennuskohteen ollessa rakennushistoriallisesti maisemallisesti tai kaupunkikuvallisesti arvokas tai suojeltu, saatetaan toimenpidelupa kuitenkin vaatia. Myös haja-asutusalueella on otettava huomioon naapurikiinteistölle mahdollisesti aiheutuva haitta. Lähelle tonttien välistä rajaa asennettavat paneelit saattavat esimerkiksi heijastaa häiritsevästi naapuritontin rakennuksiin. Tällöin luvan tarve on hyvä selvittää kaupungin tai kunnan rakennusvalvonnasta. Jos rakennuksen kantavia rakenteita joudutaan tukemaan paneelien asennuksesta seuraavan lisäkuorman vuoksi, vaatii rakentaminen aina rakennusvalvonnan luvan sekä ammattilaisen suunnitteleman toteutuksen. Jos asennusolosuhteet ovat jollakin tapaa poikkeavat tai herää epäily luvan tarpeesta, kannattaa ottaa yhteyttä kunnan rakennusvalvontaan jo projektin suunnitteluvaiheessa. [3, s 130–131; 35.]

7.2 Verkkoon liittyminen

Jakeluverkkoon liityttäessä tarvitaan aina paikallisen sähköverkkoyhtiön lupa. Kuvassa 22 on esitetty pääkaupunkiseudun jakeluverkkoyhtiöt kartalla. Lupaa haetaan Energiateollisuus ry:n yleistietolomakeella mikrotuotantolaitteiston verkkoon liittämisestä. Mikro-
tuotannoksi lasketaan jännitetasoltaan korkeintaan 1 kV:n ja teholtaan 0–30 kilovolttiamppeerin järjestelmät. Lomakkeella varmistetaan, että liitettävä laitteisto on vaatimusten mukainen. Vaatimukset on määritelty standardissa SFS-EN 50438. Lomakkeelle täytettäviä tietoja ovat mm. käyttöpaikan numero, nimellisteho, verkkoinverterin tiedot, kytket-

tävät vaiheet, enimmäisvikavirta ja järjestelmän täyttämät suojausvaatimukset. Tuotantolaitteiston on oltava myös kytkettävissä irti verkosta erotuskytkimellä, jonka luokse on esteetön pääsy. Sähkökeskuksesta on myös löydyttävä varoitus takasyöttövaarasta.



Kuva 22. Pääkaupunkiseudun jakeluverkkoyhtiöiden jakautuminen alueittain. Tuotannon liittäminen jakeluverkkoon vaatii aina paikallisen verkkoyhtiön luvan [36, s. 4].

Jos järjestelmä toteutetaan avaimet käteen periaatteella, vastaa asennusyritys lupien hankinnasta. Osalla jakeluverkkoyhtiöistä on omia tuotepaketteja verkkoon liitettävistä aurinkopaneeleista. Pääkaupunkiseudun jakeluverkkoyhtiöiden Helsen Oy:n, Vantaan energian sekä Carunan verkkosivuilta löytyy mahdollisuus paneelien hankintaan ja verkkoon liittämiseen. [3, s. 130–132.]

7.3 Sopimustyytit verkkoon liitetulle aurinkovoimatuotannolle

Verkkoon liitettyjen aurinkosähköjärjestelmien ylituotanto on mahdollista myydä sähköyhtiölle. Tätä varten tyypillisesti päivitetään olemassa olevaa kuluttajan ja sähköyhtiön välistä sähkön myyntisopimusta kattamaan myös ylijäämätuotannon ostaminen. Ylijäämätuotanto voidaan periaatteessa myydä mille sähköyhtiölle tahansa, mutta käytännön syistä sähköä ostetaan ja myydään yleensä samalla sopimuksella yhden sähköyhtiön kanssa.

Sähkön kuluttajahinta muodostuu sähköenergian hinnasta ja sähkönsiirron hinnasta. Sähköenergian osuus sähkölaskusta on vajaa puolet [3 s.129]. Tähän lisätään vielä arvonlisävero sekä sähkövero. Kuluttajan valittavissa on, mistä hän sähköenergian osuuden ostaa. Energian voi ostaa miltä tahansa sähkömarkkinoilla toimivalta sähköntoimittajalta, maantieteellisestä sijainnista riippumatta. Sähkönsiirrosta maksetaan paikalliselle sähköverkkoyhtiölle, joten kuluttaja ei voi valita siirtosopimusta itse. Sähkönsiirto on siis maantieteelliseen sijaintiin sidottu. Siirtohinnot voivat vaihdella merkittävästi eri verkkoyhtiöiden alueilla.

Tyypillisissä ostosopimuksissa verkkoyhtiö maksaa aurinkosähköjärjestelmän ylituotannosta vain tuotetun energian hinnan. Tämä tarkoittaa sitä, että verkkoon myydystä sähköstä saa huomattavasti pienemmän korvauksen, kuin mitä verkkosähkön käyttö kuluttajalle maksaa. Energian hinta on usein sidottu pohjoismaisen sähköpörssin määräämään energian spot-hintaan. Sähkøyhtiö saattaa vähentää korvauksesta vielä pienen marginaalin kilowattituntia kohden. Tällöin korvaus verkkoon myydystä energiasta jää noin 2–6 senttiin kilowattituntia kohti [3 s. 130]. Vertailun vuoksi sähkön keskimääräinen kuluttajahinta sähkölämmitteiselle omakotitaloasujalle on 15 sentin luokkaa kilowattituntia kohden [34]. Tämän vuoksi aurinkosähköstä kannattaa pyrkiä käyttämään mahdollisimman suuri osa itse. Hyvin harvat sähkøyhtiöt tarjoavat ns. pankkisopimuksia, joissa verkkoon myydystä sähköstä saa saman korvauksen kuin verkosta ostetusta sähköstä. Myös kiinteähintaiset ostosopimukset ovat mahdollisia. Näissä korvaus on viiden sentin luokkaa kilowattia kohden. [3, s.128–130.]

8 Yhteenveto

Opinnäytetyössä tutkittiin käyttöveden lämmittämisen kannattavuutta aurinkosähkön avulla. Tavoitteena oli löytää takaisinmaksuajaltaan paras vaihtoehto veden lämmitykseen. Lisäksi haluttiin selvittää veden lämmittämisen kannattavuutta mahdollisimman kevyellä ratkaisulla, johon ei sisälly kalliita ja uusimista vaativia komponentteja. Työn tuloksena saatiin laskelmien pohjalta arviot takaisinmaksuajoista kahdelle järjestelmätasolla määritetyille ratkaisulle. Määrittely jäi hieman tavoitetta ylemmälle tasolle. Yksityiskohtaisemmalla määrittelyllä olisi saatu tarkempi ja luotettavampi tulos. Järjestelmien takaisinmaksuajoiksi saatiin 15–19 vuotta. Aurinkosähköjärjestelmien elinikä voi parhaimmillaan ylittää 30 vuotta [39]. Kannattavuus on kuitenkin aina määritettävä tarkalla tapauskohtaisella arviolla.

Paneelien suora kytkeminen lämminvesivaraajan vastukseen ei ole kannattavaa. Puh-
taasti resistiivisen kuorman lineaarisuuden vuoksi optimaalinen teho saadaan vain yhdellä auringonsäteilyn intensiteetillä. Suoralla kytkennällä energiaa menee hukkaan huomattava määrä. Systeemi vaatii MPPT-toimintoon perustuvan ohjaimen tai säätimen, jotta mahdollisimman suuri osa paneelien tuottamasta energiasta saadaan hyödynnettyä. [16.]

Työssä pyrittiin keksimään ratkaisu, joka ei sisällä invertteriä. Invertteri on kallis komponentti, joka vaatii uusimista ainakin kerran aurinkosähköjärjestelmän elinkaaren aikana. Tällaista valmista ratkaisua ei tämän työn tutkimusten pohjalta selkeästi löytynyt. Tehtyjen kyselyjen perusteella suosituksena oli usein paneelien liittäminen invertterin kautta talon sähkökeskukseen, jolloin paneelien tuottamaa energiaa voidaan hyödyntää talon kaikessa kulutuksessa. Tutkimukset rajoituivat pääosin markkinoilta löytyviin valmiisiin ratkaisuihin. Prototyypimäiset toteutukset jäivät tutkimusten ulkopuolelle. Esimerkkinä tämän työn tarkastelun ulkopuolelle jääneestä toteutuksesta on Ari Kristolan vuonna 2015 tekemä insinöörityö, jossa rakennettiin säätölaitteen prototyyppi aurinkosähköpaneelikentän liittämiseksi omakotitalon varaavaan lämmitysjärjestelmään [40]. Kannattavuusvertailua ei tehty myöskään aurinkosähköjärjestelmien ja aurinkokeräimien välillä.

Aurinkosähköjärjestelmien kannattavuustekijöistä keskeisimpänä nousi esiin kohdekohtaisen kannattavuustarkastelun tärkeys. Järjestelmän kannattavuus on hyvin monien tekijöiden summa. Markkinointilupaukset tiettyä asennettua kattopinta-alan tai paneeliston

tehoa kohden saatavista vuosituotoista voivat olla varsin harhaanjohtavia. Myös paneelleille ilmoitetut nimelliset tehon arvot voidaan ilmoittaa harhaanjohtavasti. Onkin syytä kiinnittää huomiota siihen, missä olosuhteissa kyseiset arvot on määritetty. NOCT-olosuhteet vastaavat Suomen oloja huomattavasti tarkemmin kuin standarditestin mukaiset olosuhteet. On hyvä tutustua aurinkopaneelien spesifikaatioihin aina tarkasti. Markkinoinnin olisi hyvä pohjata toteutuneisiin energiantuottoihin, eikä teoreettiseen maksimiin.

Lähteet

- 1 Tahkokorpi, Markku. 2016. Aurinko energia Suomessa. Helsinki: Into kustannus Oy.
- 2 Erat, Bruno; Erkkilä, Vesa; Nyman, Christer; Peippo, Kimmo; Peltola, Seppo; Suokivi, Hannu. 2008. aurinko-opas aurinkoenergiaa rakennuksiin. Aurinkoteknillinen Porvoo: Yhdistys ry – Soltekniska Föreningen rf.
- 3 Käpylehto, Janne. 2016. Auringosta sähköt kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Helsinki: Into kustannus Oy.
- 4 Lehto, Ina; Liuksiala, Lotta; Lähde, Petri; Olenius, Meri; Orrberg, Matti; Ylinen, Marko. 2017. ST 40 käsikirja. Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus. Espoo: Sähköinfo Oy
- 5 Understand the Advantages, Disadvantages of Different Solar Cells and Who the Market Leaders Are. Verkkoaineisto. Alchemie Limited Inc. <<http://www.solar-facts-and-advice.com/solar-cells.html>>. Luettu 25.2.2020.
- 6 Perälä, Rae. 2017. Aurinko sähköä. Helsinki: Alfamer / Karisto Oy.
- 7 Käpylehto, Janne. 2014. Mökille sähköt auringosta ja tuulesta. Helsinki: Into kustannus Oy.
- 8 Kolmannen sukupolven aurinkokennot – tässä uusimmat tulokset. Uusiteknologia.fi. Verkkoaineisto. <<https://www.uusiteknologia.fi/2017/04/24/kolmannen-sukupolven-aurinkokennot-tassa-uusimmat-tulokset/>>. Päivitetty 24.4.2017. Luettu 15.3.2020.
- 9 Pirinen, Pentti; Simola Henriikka; Aalto, Juha; Kaukoranta Juho-Pekka; Karlsson Pirkko; Ruuhela Reija. 2012. Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010. Helsinki: Ilmatieteen laitos.
- 10 Neuvoja havaintosuureisiin. Ilmatieteen laitos. Verkkoaineisto. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/neuvoja-havaintosuureisiin>>. Luettu 8.5.2020.
- 11 Solar radiation tool. EU Science Hub. Verkkoaineisto. <<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>>. Päivitetty 24.2.2020. Luettu 8.5.2020.
- 12 Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film. Energy informative. Verkkoaineisto. <https://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>>. Luettu 8.5.2020.

- 13 Thin-film solar cell. Wikipedia. Verkkoaineisto. < https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_solar_cell#/media/File:Thin_Film_Flexible_Solar_PV_Installation_2.JPG>. Päivitetty 5.5.2020. Luettu 8.5.2020.
- 14 Solar cell construction. Girasolar. Verkkoaineisto. <[https://i.ebayimg.com/00/s/ODAwWDg-wMA==/z/64cAAOSwm8ZeOic9/\\$_10.JPG?set_id=880000500F](https://i.ebayimg.com/00/s/ODAwWDg-wMA==/z/64cAAOSwm8ZeOic9/$_10.JPG?set_id=880000500F)>. Luettu 8.5.2020.
- 15 Aurinkopaneeli 10W. MN Green Power. Verkkoaineisto. < https://www.partco.fi/17018-thickbox_default/aurinkopaneeli10w290x330x25mm.jpg>. Luettu 8.5.2020.
- 16 Pienenergiaa. Kämpylehto, Janne. Verkkoaineisto. < <https://pienenergia.wordpress.com/2016/03/28/aurinkopaneelin-tuotanto-mpp-mita/>>. Päivitetty 28.3.2016. Luettu 8.5.2020.
- 17 Going Solar Chapter 14 : Know Your Solar Charge Controller. Green sarawak. Verkkoaineisto. <<https://greensarawak.com/things-to-know-before-going-solar/going-solar-chapter-14-know-your-solar-charge-controller/>>. Luettu 8.5.2020.
- 18 Xiao, Weidong. Photovoltaic Power System : Modeling, Design, and Control. 2017. Yhdysvallat: John Wiley & Sons, Incorporated.
- 19 Solar Panel MPPT for Pulsed-load Applications. Mouser electronics. Verkkoaineisto. <<https://www.mouser.fi/applications/solar-panel-power-tracking/>>. Luettu 8.5.2020.
- 20 Kaapelit. Finnparttia Sähkötukku. Verkkomateriaali. < https://www.finnparttia.fi/epages/finnparttia.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/2014102905/Categories/Kaapelit>. Luettu 8.5.2020.
- 21 Seppänen Olli. Rakennusten lämmitys. 2001. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy.
- 22 Vastuspaketti Jäspi VLS/VLM 3 Kw. Verkkomateriaali. <https://www.ta-loosi.fi/vastuspaketti-jaspi-vlk-2-kw_kopio>. Luettu 8.5.2020.
- 23 Jäspi VLM ja VLS vedenlämmittimet asennus- ja käyttöohje. 2013. Kaukora Oy.
- 24 Submersible DC Water Heating Element with Adjustable Thermostat. 2019. Missouri Wind and Solar Ltd. Verkkoaineisto. <<https://mwands.com/adjustable-water-heating-element>>. Luettu 8.5.2020.

- 25 Veden kulutus. Motiva. Verkkoaineisto. <https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/hyva_arki_kotona/vedenkulutus>. Päivitetty 29.8.2019. Luettu 8.5.2020.
- 26 Veden kulutus. Suomen ympäristöopisto SYKLI. Verkkoaineisto. <<https://www.ymparistoosaava.fi/sosiaali-ja-terveysala/index.php?k=22672>>. Luettu 8.5.2020.
- 27 Vedenkulutus taloyhtiössä. Motiva. Verkkoaineisto. <https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiot/energiaeksperttitoiminta/tietoa_energian_ja_vedenkulutuksesta/vedenkulutus_taloyhtiössä>. Päivitetty 26.2.2019. Luettu 8.5.2020.
- 28 Laskukaavat: Lämmin käyttövesi. Motiva. Verkkoaineisto. <https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energiankaytto/kulutuksen_normitus/laskukaavat_lammin_kayttovesi>. Päivitetty 6.2.2019. Luettu 8.5.2020.
- 29 Aurinkosähköjärjestelmien hintatasot ja kannattavuus. Finsolar. Verkkoaineisto. <<https://finsolar.net/kannattavuus/aurinkosahkon-hinnat-ja-kannattavuus/>>. Päivitetty 12.5.2020. Luettu 19.5.2020.
- 30 Orrberg, Matti. Kuinka on parasta arvioida kannattavuus aurinkosähköjärjestelmässä? Sähköala 4/2020. 2.4.2020.
- 31 Hintakohauttaja Caruna kiittelee vuolaasti hallituksen sähköuudistusta – laskunmaksajat sättivät. Yle Uutiset. Verkkoaineisto. <<https://yle.fi/uutiset/3-11225067>>. Päivitetty 25.2.2020. Luettu 19.5.2020.
- 32 Sähkölaitteiden keskimääräinen sähkönkulutus. Vattenfall AB. Verkkoaineisto. <<https://www.vattenfall.fi/energianeuvonta/sahkonkulutus/sahkolaitteiden-energiankulutus/>>. Luettu 19.5.2020.
- 33 Kannattavuuslaskurit. Finsolar. Verkkoaineisto. <<https://finsolar.net/kannattavuus/kannattavuuslaskurit/>>. Luettu 19.5.2020.
- 34 Energian hinnat. Tilastokeskus. ISSN=1799-7984. 4. vuosineljännes 2019, Liitekuvio 5. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. Helsinki. Verkkoaineisto <http://www.stat.fi/til/ehi/2019/04/ehi_2019_04_2020-03-12_kuv_005_fi.html>. Luettu 19.5.2020.
- 35 Suomi, Tapio. Suomen lähienergialiitto ry. Verkkoaineisto. <<https://www.la-hienergia.org/normitalkoot-poisti-pilvia-aurinkoenergian-edesta-nyt-asentaminen-hoituu-ilman-lupaa>>. päivitetty 16.5.2017. Luettu 19.5.2020.
- 36 Lahti, Tuomas. 2017. Jakeluverkon kunnossapidon ja sen dokumentoinnin kehittäminen. Insinööritoimisto. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

- 37 Amerisolar, Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., Ltd. Verkkoaineisto. <<http://www.weamerisolar.com/d/file/english/product/pro11555/2019/09-04/0f85857244fa10b7a59ade81bab8bfcd.pdf>>. Luettu 24.5.2020.
- 38 JA Solar Technology Co. Ltd. 2018. Verkkoaineisto. <<https://www.ja-solar.com/uploadfile/2018/0803/20180803102956815.pdf>>. Luettu 24.5.2020.
- 39 Aurinkosähköjärjestelmän teho. Motiva. Verkkoaineisto. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkojarjestelman_teho>. Päivitetty 24.8.2017. Luettu 8.5.2020.
- 40 Kristola, Ari. 2015. Aurinkosähköpaneelikentän kuormitussäädin lämmityskäyttöön. Insinööritö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 41 3,10kW musta PERC yksikide aurinkosähköjärjestelmä. Nordsolar.fi. Verkkoaineisto. <<https://nordsolar.fi/jarjestelmat/perc-musta/solar-3-10kw-musta>>. Luettu 24.5.2020

Liite 1. Amerisolar AS-6M30-HC-paneelin sähköiset ominaisuudet

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STC					
Maximum Power (P_{max})	315W	320W	325W	330W	335W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	40.0V	40.2V	40.4V	40.6V	40.8V
Short Circuit Current (I_{sc})	10.06A	10.14A	10.22A	10.30A	10.38A
Voltage at Maximum Power (V_{mp})	33.2V	33.4V	33.6V	33.8V	34.0V
Current at Maximum Power (I_{mp})	9.49A	9.59A	9.68A	9.77A	9.86A
Module Efficiency (%)	18.65	18.94	19.24	19.53	19.83
Operating Temperature	-40°C to +85°C				
Maximum System Voltage	1000V DC/1500V DC				
Fire Resistance Rating	Type 1 (in accordance with UL1703)/Class C (IEC61730)				
Maximum Series Fuse Rating	20A				

STC: Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, AM1.5

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT NOCT					
Maximum Power (P_{max})	235W	239W	243W	247W	251W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	37.0V	37.2V	37.4V	37.6V	37.8V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.15A	8.22A	8.29A	8.36A	8.43A
Voltage at Maximum Power (V_{mp})	30.2V	30.4V	30.6V	30.8V	31.0V
Current at Maximum Power (I_{mp})	7.79A	7.87A	7.95A	8.02A	8.10A

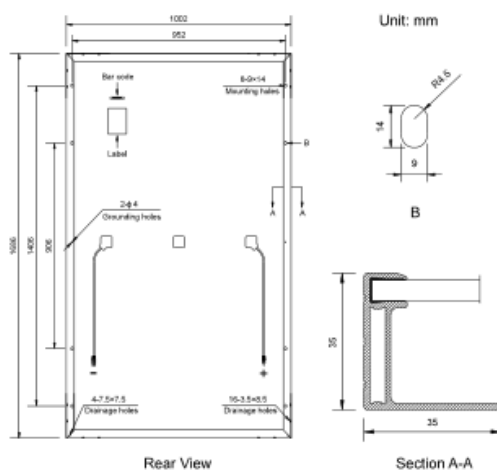
NOCT: Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s

MECHANICAL CHARACTERISTICS	
Cell type	Monocrystalline
Number of cells	120 (6x20)
Module dimensions	1686x1002x35mm (66.38x39.45x1.38inches)
Weight	18.5kg (40.8lbs)
Front cover	3.2mm (0.13inches) tempered glass with AR coating
Frame	Anodized aluminum alloy
Junction box	IP68, 3 diodes
Cable	4mm ² (0.006inches ²)
Connector	MC4 or MC4 compatible

TEMPERATURE CHARACTERISTICS	
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	43°C±2°C
Temperature Coefficients of P_{max}	-0.36%/°C
Temperature Coefficients of V_{oc}	-0.28%/°C
Temperature Coefficients of I_{sc}	0.05%/°C

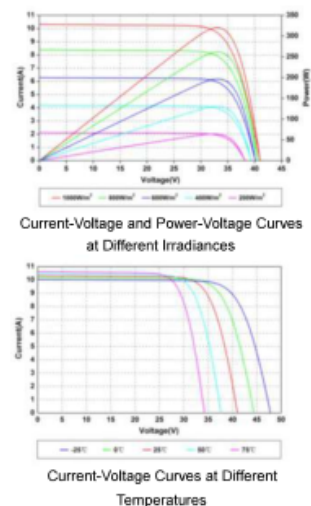
PACKAGING	
Standard packaging	30pcs/pallet
Module quantity per 20' container	360pcs
Module quantity per 40' container	780pcs(GP)/858pcs(HQ)

ENGINEERING DRAWINGS



Specifications in this datasheet are subject to change without prior notice.

IV CURVES

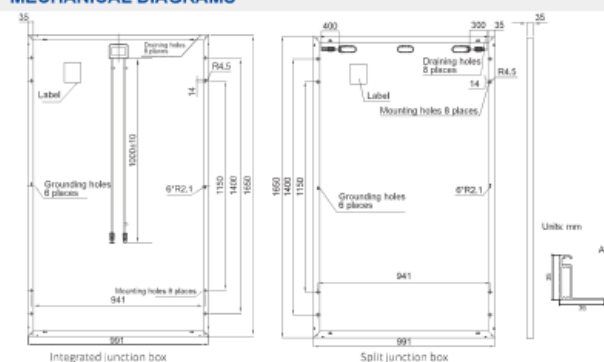


Amerisolar and Amerisolar logo denoted with ® are registered trademarks of Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., Ltd.

Liite 2. JA Solar JAM60S01 290-310/PR-paneelin sähköiset ominaisuudet

JA SOLAR
JAM60S01 290-310/PR Series

MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	18.2kg±3%
Dimensions	1650mm×991mm×35mm
Cable Cross Section Size	4mm ²
No. of cells	60(6x10)
Junction Box	IP67, 3 diodes
Connector	MC4 Compatible(1000V) QC 4,10-35(1500V)
Packaging Configuration	30 Per Pallet

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM60S01 ~290/PR	JAM60S01 ~295/PR	JAM60S01 ~300/PR	JAM60S01 ~305/PR	JAM60S01 ~310/PR
Rated Maximum Power(P _{max}) [W]	290	295	300	305	310
Open Circuit Voltage(V _{oc}) [V]	39.48	39.64	39.85	40.05	40.30
Maximum Power Voltage(V _{mp}) [V]	31.80	32.03	32.26	32.57	32.84
Short Circuit Current(I _{sc}) [A]	9.57	9.66	9.75	9.85	9.91
Maximum Power Current(I _{mp}) [A]	9.12	9.21	9.30	9.37	9.44
Module Efficiency [%]	17.7	18.0	18.3	18.7	19.0
Power Tolerance	0~+5W				
Temperature Coefficient of I _{sc} (α _{Isc})	+0.060%/°C				
Temperature Coefficient of V _{oc} (β _{Voc})	-0.300%/°C				
Temperature Coefficient of P _{max} (γ _{Pmp})	-0.380%/°C				
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G				

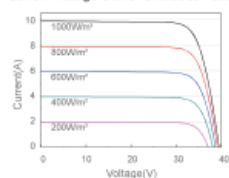
Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

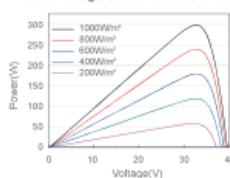
TYPE	JAM60S01 ~290/PR	JAM60S01 ~295/PR	JAM60S01 ~300/PR	JAM60S01 ~305/PR	JAM60S01 ~310/PR	OPERATING CONDITIONS
Rated Max Power(P _{max}) [W]	213	217	221	224	228	Maximum System Voltage 1000V/1500V DC(IEC)
Open Circuit Voltage(V _{oc}) [V]	36.34	36.57	36.75	36.95	37.15	Operating Temperature -40°C~+85°C
Max Power Voltage(V _{mp}) [V]	29.56	29.63	29.69	29.90	30.18	Maximum Series Fuse 20A
Short Circuit Current(I _{sc}) [A]	7.61	7.69	7.78	7.86	7.93	Maximum Static Load,Front 5400Pa
Max Power Current(I _{mp}) [A]	7.21	7.32	7.43	7.50	7.55	Maximum Static Load,Back 2400Pa
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G					NOCT 45±2°C
						Application Class Class A

CHARACTERISTICS

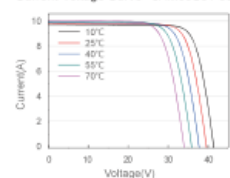
Current-Voltage Curve JAM60S01-300/PR



Power-Voltage Curve JAM60S01-300/PR



Current-Voltage Curve JAM60S01-300/PR



Premium Cells, Premium Modules

Version No. : Global_EN_20180514A

Liite 3. Yhteenveto investoinnin tuotto- ja kannattavuuslaskelmat järjestelmälle yksi 10 prosentin hyötysuhteella

Järjestelmän elinikä vuosina	Oman sähköntuotannon arvo ja myyntituotot €	Investointi- ja ylläpitokustannukset €	Kassavirta €/v	Investoinnin sisäisiä korkokantoja % (IRR)	Investoinnin kumulatiivinen tuotto €/v (0% korko)	Investoinnin nettonykyarvo ja (NPV) valitulla	Takaisinmaksu-aika valitulla investoinnin	Ostosähkön hinta [eur/kWh]	Myyntiin menevän ylijäämäsähkön hinta	Aurinkosähkön tuotanto kWh/v
0	0,0 €	-2 450,0 €	-2 450,0 €		-2 450 €			0,15 €		
1	170,1 €	0,0 €	170,1 €	-93,1%	-2 280 €	-2 239 €	1	0,15 €	0,00 €	1134
2	172,6 €	0,0 €	172,6 €	-69,8%	-2 107 €	-2 076 €	1	0,15 €	0,00 €	1128
3	175,2 €	0,0 €	175,2 €	-50,2%	-1 932 €	-1 914 €	1	0,16 €	0,00 €	1122
4	177,8 €	0,0 €	177,8 €	-36,3%	-1 754 €	-1 720 €	1	0,16 €	0,00 €	1117
5	180,4 €	0,0 €	180,4 €	-26,6%	-1 574 €	-1 593 €	1	0,16 €	0,00 €	1111
6	183,1 €	0,0 €	183,1 €	-19,6%	-1 391 €	-1 433 €	1	0,17 €	0,00 €	1106
7	185,8 €	0,0 €	185,8 €	-14,4%	-1 205 €	-1 275 €	1	0,17 €	0,00 €	1100
8	188,6 €	0,0 €	188,6 €	-10,4%	-1 016 €	-1 117 €	1	0,17 €	0,00 €	1095
9	191,4 €	0,0 €	191,4 €	-7,4%	-825 €	-960 €	1	0,18 €	0,00 €	1089
10	194,3 €	0,0 €	194,3 €	-5,0%	-631 €	-804 €	1	0,18 €	0,00 €	1084
11	197,2 €	0,0 €	197,2 €	-3,0%	-434 €	-648 €	1	0,18 €	0,00 €	1078
12	200,1 €	0,0 €	200,1 €	-1,5%	-234 €	-494 €	1	0,19 €	0,00 €	1073
13	203,1 €	0,0 €	203,1 €	-0,2%	-30 €	-340 €	1	0,19 €	0,00 €	1068
14	206,1 €	0,0 €	206,1 €	0,9%	176 €	-187 €	1	0,19 €	0,00 €	1062
15	209,2 €	0,0 €	209,2 €	1,8%	385 €	-34 €	1	0,20 €	0,00 €	1057
16	212,3 €	0,0 €	212,3 €	2,6%	597 €	117 €	0	0,20 €	0,00 €	1052
17	215,5 €	0,0 €	215,5 €	3,2%	813 €	268 €	0	0,21 €	0,00 €	1046
18	218,7 €	0,0 €	218,7 €	3,8%	1 031 €	418 €	0	0,21 €	0,00 €	1041
19	221,9 €	0,0 €	221,9 €	4,3%	1 253 €	568 €	0	0,21 €	0,00 €	1036
20	225,2 €	0,0 €	225,2 €	4,7%	1 478 €	716 €	0	0,22 €	0,00 €	1031
21	228,6 €	0,0 €	228,6 €	5,1%	1 707 €	864 €	0	0,22 €	0,00 €	1026
22	232,0 €	0,0 €	232,0 €	5,4%	1 939 €	1 011 €	0	0,23 €	0,00 €	1020
23	235,5 €	0,0 €	235,5 €	5,7%	2 174 €	1 158 €	0	0,23 €	0,00 €	1015
24	239,0 €	0,0 €	239,0 €	6,0%	2 413 €	1 303 €	0	0,24 €	0,00 €	1010
25	242,5 €	0,0 €	242,5 €	6,2%	2 656 €	1 448 €	0	0,24 €	0,00 €	1005
26	246,1 €	0,0 €	246,1 €	6,4%	2 902 €	1 593 €	0	0,25 €	0,00 €	1000
27	249,8 €	0,0 €	249,8 €	6,6%	3 152 €	1 736 €	0	0,25 €	0,00 €	995
28	253,5 €	0,0 €	253,5 €	6,7%	3 405 €	1 879 €	0	0,26 €	0,00 €	990
29	257,3 €	0,0 €	257,3 €	6,9%	3 663 €	2 021 €	0	0,26 €	0,00 €	985
30	261,1 €	0,0 €	261,1 €	7,0%	3 924 €	2 162 €	0	0,27 €	0,00 €	980
YHTEENSÄ	4 564,1 €	-2 450,0 €	2 162,1 €	7,0%	3 924 €	2 162 €	15			31657

Liite 4. Yhteenveto investoinnin tuotto- ja kannattavuuslaskelmat järjestelmälle kaksi 10 prosentin hyötysuhteella

Järjestelmän elinikä vuosina	Oman sähköntuotannon arvo ja myyntituotot €	Investointi- ja ylläpitokustannukset €	Kassavirta €/v	Investoinnin sisäisiä korkokantaa % (IRR)	Investoinnin kumulatiivinen tuotto €/v (0% korko)	Investoinnin nettonykyarvo ja (NPV) valitulla	Takaisinmaksu-aika valitulla investoinnin	Ostosähkön hinta [eur/kWh]	Myyttiin menevän ylijäämäsähkön hinta	Aurinkosähkön tuotanto kWh/v
0	0,0 €	-4 000,0 €	-4 000,0 €		-4 000 €			0,15 €		
1	261,6 €	0,0 €	261,6 €	-93,5%	-3 738 €	-3 670 €	1	0,15 €	0,00 €	1744
2	265,5 €	0,0 €	265,5 €	-70,8%	-3 473 €	-3 420 €	1	0,15 €	0,00 €	1735
3	269,5 €	0,0 €	269,5 €	-51,4%	-3 203 €	-3 171 €	1	0,16 €	0,00 €	1727
4	273,5 €	0,0 €	273,5 €	-37,5%	-2 930 €	-2 872 €	1	0,16 €	0,00 €	1718
5	277,6 €	0,0 €	277,6 €	-27,8%	-2 652 €	-2 677 €	1	0,16 €	0,00 €	1710
6	281,7 €	0,0 €	281,7 €	-20,7%	-2 371 €	-2 432 €	1	0,17 €	0,00 €	1701
7	285,9 €	0,0 €	285,9 €	-15,4%	-2 085 €	-2 188 €	1	0,17 €	0,00 €	1692
8	290,2 €	0,0 €	290,2 €	-11,5%	-1 795 €	-1 945 €	1	0,17 €	0,00 €	1684
9	294,5 €	0,0 €	294,5 €	-8,4%	-1 500 €	-1 703 €	1	0,18 €	0,00 €	1676
10	298,9 €	0,0 €	298,9 €	-5,9%	-1 201 €	-1 463 €	1	0,18 €	0,00 €	1667
11	303,3 €	0,0 €	303,3 €	-3,9%	-898 €	-1 224 €	1	0,18 €	0,00 €	1659
12	307,8 €	0,0 €	307,8 €	-2,3%	-590 €	-986 €	1	0,19 €	0,00 €	1651
13	312,4 €	0,0 €	312,4 €	-1,0%	-278 €	-749 €	1	0,19 €	0,00 €	1642
14	317,1 €	0,0 €	317,1 €	0,1%	40 €	-513 €	1	0,19 €	0,00 €	1634
15	321,8 €	-1 200,0 €	-878,2 €	-4,0%	-839 €	-1 153 €	1	0,20 €	0,00 €	1626
16	326,6 €	0,0 €	326,6 €	-2,0%	-512 €	-920 €	1	0,20 €	0,00 €	1618
17	331,5 €	0,0 €	331,5 €	-0,6%	-181 €	-688 €	1	0,21 €	0,00 €	1610
18	336,4 €	0,0 €	336,4 €	0,5%	156 €	-457 €	1	0,21 €	0,00 €	1602
19	341,4 €	0,0 €	341,4 €	1,3%	497 €	-227 €	1	0,21 €	0,00 €	1594
20	346,5 €	0,0 €	346,5 €	2,0%	844 €	2 €	0	0,22 €	0,00 €	1586
21	351,7 €	0,0 €	351,7 €	2,6%	1 195 €	229 €	0	0,22 €	0,00 €	1578
22	356,9 €	0,0 €	356,9 €	3,1%	1 552 €	456 €	0	0,23 €	0,00 €	1570
23	362,2 €	0,0 €	362,2 €	3,5%	1 915 €	681 €	0	0,23 €	0,00 €	1562
24	367,6 €	0,0 €	367,6 €	3,9%	2 282 €	905 €	0	0,24 €	0,00 €	1554
25	373,1 €	0,0 €	373,1 €	4,2%	2 655 €	1 128 €	0	0,24 €	0,00 €	1546
26	378,7 €	0,0 €	378,7 €	4,5%	3 034 €	1 350 €	0	0,25 €	0,00 €	1539
27	384,3 €	0,0 €	384,3 €	4,8%	3 418 €	1 570 €	0	0,25 €	0,00 €	1531
28	390,0 €	0,0 €	390,0 €	5,0%	3 808 €	1 790 €	0	0,26 €	0,00 €	1523
29	395,8 €	0,0 €	395,8 €	5,2%	4 204 €	2 009 €	0	0,26 €	0,00 €	1516
30	401,7 €	0,0 €	401,7 €	5,4%	4 606 €	2 226 €	0	0,27 €	0,00 €	1508
YHTEENSÄ	7 021,7 €	-5 200,0 €	2 226,0 €			2 226 €	19			48702